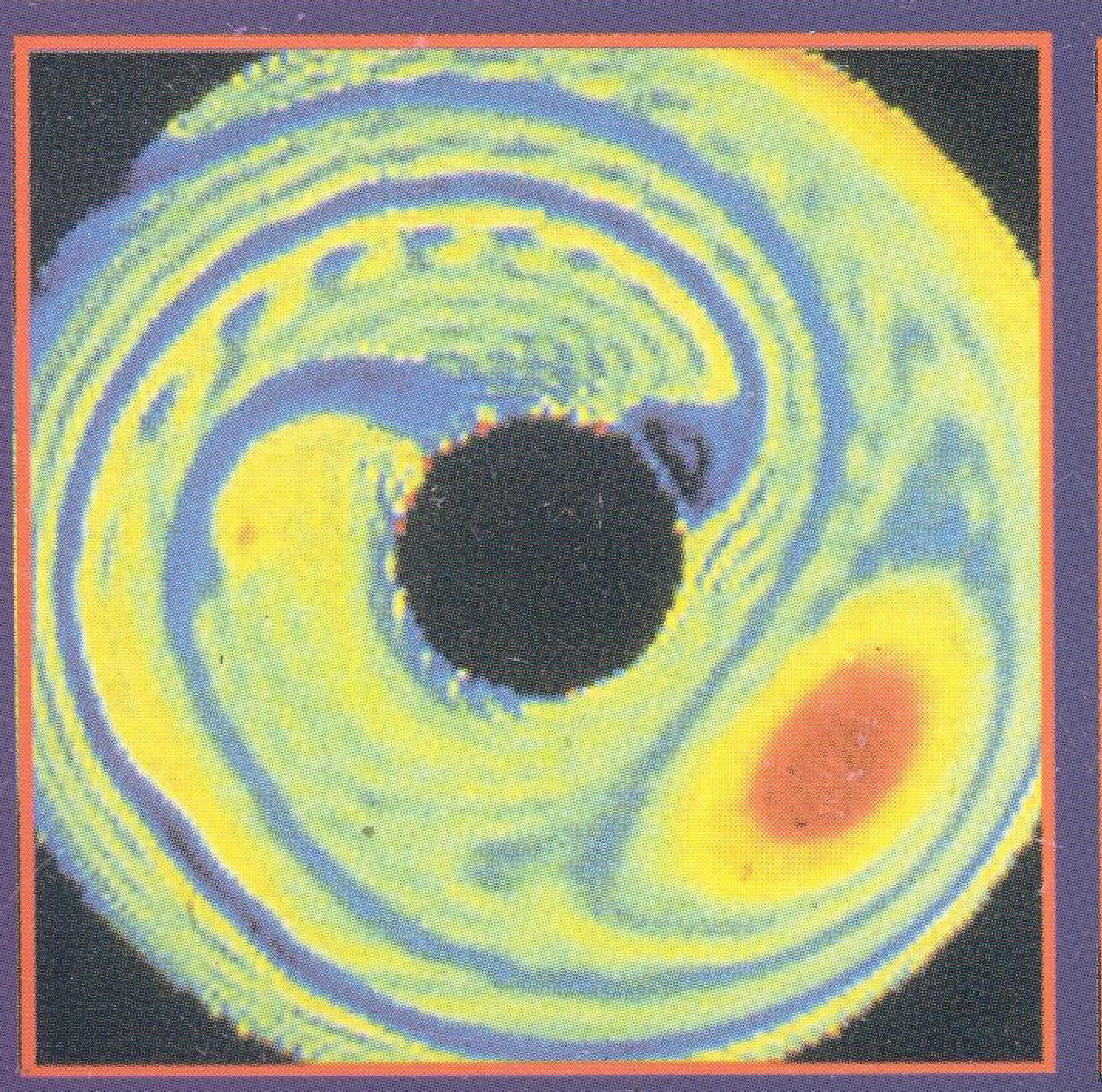
المجلس الأعلى للثقافة

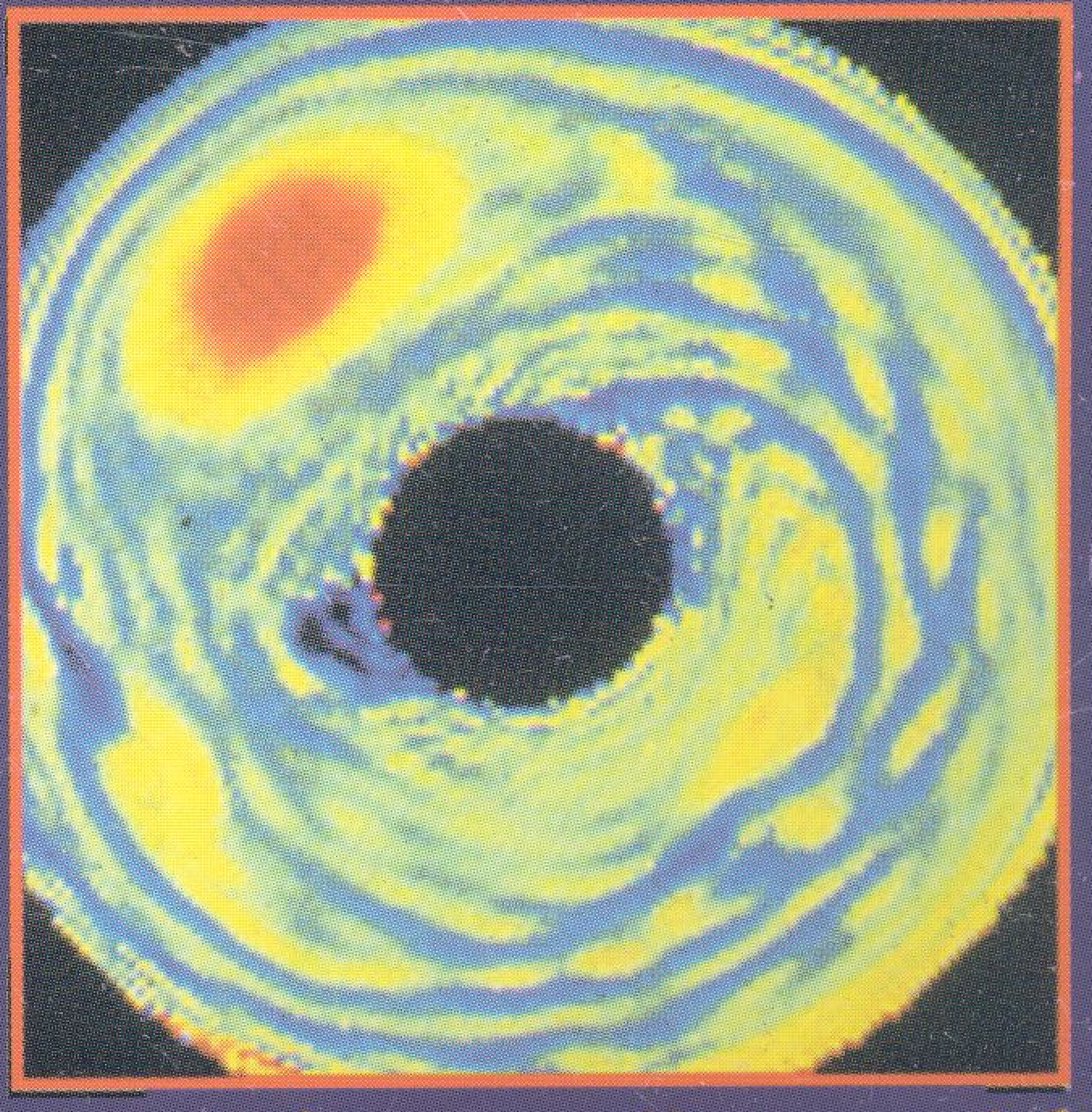
الهيولية
فى الكون

ترجمة : بـارى پـاركـر
تأليف : على يوسف على

المشروع القومي للترجمة







التعقيد المذهل للكون

220

المشروع القومى للترجمة

الهيولية فى الكون

التعقيد المذهل للكون

تأليف : بارى باركر

ترجمة : على يوسف على



٢٠٠٢

المشروع القومى للترجمة

إشراف : جابر عصفور

- العدد : ٢٢٠
- الهيولية فى الكون (التعقيد المذهل للكون)
- بارى پاركر
- على يوسف على
- الطبعة الأولى ٢٠٠٢

ترجمة كاملة لكتاب :

CHAOS IN THE COSMOS

The Stunning Complexity

of the Universe

Barry Parker : تأليف بارى باركر

Plenum Press : الصادر عن

1996

شارع الجبلاية بالأوبرا - الجزيرة - القاهرة ت ٧٣٥٢٣٩٦ فاكس ٧٣٥٨٠٨٤

El Gabalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo

Tel : 7352396 **Fax :** 7358084 **E. Mail :** asfour @ onebox. com

مقدمة المترجم

عزيزى القارئ الكريم

يعرض كتابنا هذا لظواهر فلكية حيرت ألباب العلماء قرونًا طويلة؛ ما هو السر وراء الفجوات فى حزام الكويكبات؟ وهل تكون فجوات حلقات زحل لنفس السبب أم لسبب آخر؟ لماذا تمطرنا منطقة معينة من حزام الكويكبات بأكبر قدر من النيازك التى تصيب أرضنا؟ ما السر وراء البقعة الحمراء الهائلة فى كوكب المشترى، والتى تبدو كإعصار يمكن أن يبتلع الكرة الأرضية مرتين؟

أسئلة لا تحصى لا تقف عند حاضر الكون الذى نعيش فيه، بل تتناول أيضا ماضيه ومستقبله، كان على العلماء أن ينتظروا إلى النصف الثانى من القرن العشرين حتى يجدوا وسيلة للتصدى لها.

وتمثلت هذه الوسيلة فى علم جديد، عرف بين العامة باسم "Chaos Science"، وبين المتخصصين باسم "الديناميكا اللاخطية "non-linear dynamics، كفرع من فروع الرياضيات البحتة، فما قصة هذا العلم الوليد، وما الذى لديه من جديد يقدمه فى مضمار العلم؟

لقد ظهر هذا العلم ليزيل وهمًا حول ظواهر الطبيعة ساد منذ مطلع التاريخ، ألا وهو وصف الظواهر الطبيعية بالعشوائية حين تتأبى على التحليل التقليدي. إنك حين تنظر لعمود الدخان المتصاعد من فنجان قهوتك لا يخطر ببالك البتة أنه يخضع لتحليل علمى دقيق، بل هو فى ناظريك مجرد جزيئات تتبعثر كيفما اتفق. وما يقال عن هذا الدخان المتصاعد يقال عن تكون السحب، وتأرجح أغصان الشجر، وغير ذلك من ظواهر سكت العلم عن التصدى لها، زعما بأنها تخرج عن نطاق تحليله ودراسته.

ولكن العلم الجديد له قول آخر، إن هذه الظواهر تخضع من ناحية المبدأ لقوانين منضبطة، وما صورة العشوائية فيها إلا بسبب قصور الوسائل العلمية التقليدية عن معالجتها، وهو قصور فى المنهج العلمى يتولى هذا العلم معالجته.

وما أن ظهر هذا الأسلوب الجديد فى التحليل العلمى حتى انطلق يشق آفاق كافة العلوم بلا استثناء، الطب بفرعيه العضوى والنفسي، والجيولوجيا والإلكترونيات والاتصالات والفيزياء، وبطبيعة الحال، الفلك، وهو مجال كتابنا هذا.

وسوف يتولى الكتاب فى فصوله الأولى تقديم عرض شيق لتاريخ هذا العلم ومبادئه الأساسية، ومنه ستعلم أنه قام على أكتاف علماء فى مجالات مختلفة، وكان الحاسوب هو الأداة المطلوبة لظهوره، فلولاه ما رأى النور.

حول تسمية عربية للعلم الجديد

يكاد يكون هذا العلم مجهولا تماما للمكتبة العربية، فلم نسمع بعد عن كتاب أو مقالة علمية تتناوله، اللهم إلا بعض الإشارات المتفرقة عما يسمى "علم الفوضى"، وهى التسمية التى ارتآها البعض لهذا العلم، على أساس أن لفظ الفوضى هو المقابل المعجمى لكلمة Chaos.

وسوف تحس بنفسك مدى ما فى هذه التسمية من خطأ، حيث إن العلم يتناول ظواهر أبعد ما تكون عن صفة الفوضى، ومثل هذا الخطأ هو المتوقع لأسلوب الترجمة اعتمادا على المقابلات المعجمية، إذ تخضع عملية وضع المصطلحات لقواعد علمية يعرفها أهل التخصص.

وأسوأ ما فى هذه التسمية هو تأثيرها النفسي، بل لعل هذا الخطأ هو سر انصراف الثقافة العربية عن هذا العلم الذى هز العالم المتقدم لنصف قرن على الأقل. ومصداق ذلك أنه حين عرضت على أحد الناشرين ترجمة كتاب "Chaos Making a New Science"، وهو أشهر ما ألف عن هذا العلم، نصحه ناصح بأنه سوف يرتكب خطأ جسيما لو نشر كتابا عن "علم الفوضى!"، ونحمد الله أن الكتاب قد طبع عن طريق المجلس الأعلى للثقافة.

ولكن السؤال الذى كان على أن أتصدى له هو وضع اسم لهذا العلم، بعد أن رفضت الاسم الذى شاع به فى أوساطنا الثقافية. هناك تسمية أخرى هى "علم الشواش"، وليست بأسعد حظا من سابقتها؛ لأن المعنى متقارب بقدر كبير.

وإن أكبر تأييد لرفضى للفظ "الفوضى" يأتى من بلد رفض الاسم الشائع لهذا العلم فى بلاده، الا وهى كلمة chaos، فيكاد الإجماع ينعقد على أن هذه التسمية ليست موفقة بالمرة، لكونها توحى بعكس مضمون العلم، وهو نفس السبب الذى قلت به فى رفضى للمقابل المعجمى للكلمة (يمكن الرجوع للكتاب المذكور بعاليه لبيان ما وجه لهذه التسمية من نقد)

إن ما فعلته فى الواقع هو اللجوء للتراث العربي، ذلك أن كلمة Chaos هى فى الأصل كلمة إغريقية تصدى لها العرب بالترجمة فى فجر نهضة العرب العلمية، فكانت "هيولى"، ويقصد به المادة الأولى التى منها كان الكون، وقد وردت هذه الكلمة فى كتاب شذور الذهب لشوقى أمير الشعراء حيث يقول ردا على الملحد: "لقد علمنا كما علمت الهيولا، ولكنا لم ننكر اليد الطولى".

ولما كانت الكلمة قد اندثرت تقريبا من الاستخدام الشائع، ولم تعد تعطى انطباعا معينا يشوه المعنى الحقيقى لهذا العلم، فهى بذلك تكون مؤهلة أن تكتسب معنى جديدا، أليس هذا ما حدث حين اختيرت كلمة "القطار" لتدل على تلك الآلة الحديثة، فاكتسب اللفظ معنى جديدا خلاف معناه التراثي؟

على أننى فى الواقع لا أجد الكلمة منبتة الصلة تماما بالمعنى التراثي، فالمعنى الجديد والمعنى التراثى مشتركان فى كونهما يتحدثان معا عن ظواهر الطبيعة، وإن كان أحدهما يكتسب ثوبا أسطوريا والآخر ثوبا علميا.

ومن جهة أخرى فإن من الأمور التى يجب أن تراعى عند وضع مصطلح ما هو استخداماته فى السياقات المختلفة، فهل من الجائز مثلا أن نقول عن تحليل علمى أنه "التحليل الفوضوي؟"، وهل يمكن أن يكون عنوان كتابنا هذا "الفوضى فى الكون؟".

وإنى وإن كنت قاطع الرفض لتسمية هذا العلم بكل ما يربطه بالفوضى، فإننى لست منتصرا للتسمية التى أقترحها بهذه القطعية، كل ما فى الأمر أنها التسمية التى فتح الله بها على حين عزت التسميات المناسبة، والميدان مفتوح للاجتهاد، فقط أن يكون على الأسس المقبولة علميا لوضع المصطلحات،

والله الموفق والمستعان

مقدمة المؤلف

لم يكد العالم الفيزيائى الشهير هنرى بوانكريه يصدق عينيه، لقد ظل منكبا لعدة أشهر من عام ١٨٨٩على أشهر مسألة فى العلم آنذاك، نظام نجمى من ثلاثة أجرام كونية فى ترابط تجاذبي، إلا أن ما وصل إليه فى النهاية لم يزد عن قدر لا يستهان به من الإحباط والقلق، فمنذ عصر نيوتن والمسألة تعتبر كغيرها من المسائل الفيزيائية، ليس مطلوبا لحلها سوى شيء من العبقرية المثابرة، ولكن تجربة بوانكريه معها بينت أن الأمر ليس بهذه البساطة. فهو كلما غاص فى المسألة، بدت له أمور غريبة غير مفهومة، إلى أن اضطر للتسليم بأنها مستعصية تماما على الحل. وعندما أخذ اليأس منه مأخذه، اضطر إلى الانصراف عنها إلى مواضيع أخرى.

إن ما رآه بوانكريه هو أول لمحة من ظاهرة تسمى الآن "الهيولية"، وبعدها ظل الأمر فى سبات طوال تسعين عاما. لم يكتب عن الأمر كتاب واحد، ولم تزد الأبحاث عن بضعة من وريقات علمية. ثم كانت الصحوة فى الثمانينات، ظهر من وقتها إلى الآن آلاف من الأبحاث وعشرات من الكتب والمراجع. لقد ولد علم حديث جذب الانتباه حينما ساهم فى إحداث فتوحات علمية فى مجالات لا حصر لها.

ما هى الهيولية؟ إن لكل فرد انطباعه الخاص عما تعنيه الكلمة، ولكن المستقر لدى الجميع أنها شيء مختلف تماما عن العشوائية وعدم النظام والتمرد على التحكم. ولسوف أحاول فى كتابى هذا أن أبين معنى الهيولية وسبب ما أثارته من اهتمام بالغ. فلنظرية الهيولية كما سيرى القارئ تاريخ حافل بالفتنة والثراء، فهى علم جديد مثير يقف على قدم المساواة مع كافة نظريات العلم العظيمة فى وقتنا المعاصر. على أنها لا تزال مليئة بالأمور الخلافية، فهى لم تزل فى طور الميلاد، وتحتوى على العديد مما لم يثبت بصفة قاطعة بعد، ولكن الأمور واعدة بقدر كبير.

ويعرض علم الهيولية فى ثنايا كتابنا هذا من منظور علم الفلك، ومن ثم فإن ظواهر الهيولية فى الثقوب السوداء والنجوم النابضات (البلسارات) وأشباه النجوم

(الكوازرات) وتصادم المجرات ونشأة الكون سوف تكون من الموضوعات الرئيسية منه. على أننا سوف نتعرض أيضا إلى موضوعات أخرى متعلقة بهذا العلم الوليد، كأشكال الفراكتال والجاذبات الغريبة والفضاء القابل للطى والمط وفئات جوليا وماندلبرو، وغير ذلك من الموضوعات ذات الصلة.

ومن الصعب فى كتاب كهذا تحاشى المصطلحات والتعبيرات التخصصية كلية، ولقد بذلت فى ذلك قدر استطاعتي، كما قمت بشرح ما لم يكن بد من ذكره، ثم أردفت الكتاب بمسرد للمصطلحات لتعم الفائدة.

وإننى لشاكر للعلماء الذين قدموا لى يد العون، فلقد أجريت الكثير من اللقاءات والمكالمات الهاتفية مع العديد من الشخصيات التى سيرد ذكرها فى الكتاب، وكثير منهم أمدنى بمطبوعات ومصورات، ولكم أود أن أعبر عن عظيم امتنانى لكل منهم شخصيا، وهم بفرلى برجر، لوكا بومبلي، روبرت بتشلر، ماثاو تشبتويك، ماثاو كوليبه، جورج كونتوبولوس، مارتين دونكان، جيرى جولوب، دافيد هوبل، جورد أروين، ك. أ. إنيان، جيمس لوتشنر، تيرى ماتلسكي، فينسنت مونكريف، سفيند روغ، جيرالد سوسمان، جين سوانك، ج. وينرايت، وجاك ويزدوم.

وقد قامت لورى سكوفيلد بإنتاج أغلب الأشكال التوضيحية، وأود شكرها على ما قامت به من عمل ممتاز، وكذا ماثاو كوليبه وجورج أوروين على الكثير من الصور المتنجة حاسوبيا. كما أود شكر لندا جرينسبان ريجان، وميليكا مككورميك وفريق دار بلينم على المساهمة فى إخراج الكتاب بصورته هذه، وأخيرا أود أن أقدم الشكر لزوجتى على مآزرتها خلال تأليف الكتاب.

قاموس مصطلحات

أفق الأحداث : events horizon منطقة محيطة بالثقب الأسود تعزل الداخل إليها تماما عن الكون.

العزم الزاوى : angular momentum مقياس للحركة المغزلية.

المعادلة الموجية : wave function معادلة تصف حالة الجسيمات فى النظرية الكمية.

إنتروبيا – : entropy اصطلاح يشير إلى الطاقة المشتتة نتيجة العمليات الحرارية أو الحيوية. ينص قانون الديناميكا الحرارية الثانى على أن كافة العمليات الحرارية التى تنتج فى نظام مغلق (ومنها الكون) تسير فى اتجاه زيادة الانتروبيا. ٢- كما يشير المصطلح إلى ميل النظم عامة إلى التشتت والعشوائية. وبهذا المفهوم يتجاوز نطاق المصطلح الديناميكا الحرارية فيدخل مثلا فى علم نظم المعلومات، بل والنظم الاجتماعية. ٣- كما يعبر المصطلح أيضا عن عدم الانعكاسية، فليس من المحتمل أبدا بعد انصهار مكعب من الثلج فى كوب من الماء أن تتجمع جزيئات من الماء مرة أخرى لتكون مكعبا فى درجة حرارة أقل من السائل. ٤- كما ينظر إليها أيضا كمقياس للمعلومات، فالكوب المحتوى على كمية من الماء المتجانس فى درجة حرارته تحمل قدرا من المعلومات أقل من التى تحتوى على ماء ساخن مغمور فيه مكعب من الثلج (عدم تجانس) . ٥- ويمثل قانون التزايد الدائم للانتروبيا أحد القوانين الراسخة فى الطبيعة. ٦- ولهذا السبب يعبر المصطلح أيضا عن سريان الزمن. فلو أنك نظرت إلى صورتين لكوب فى إحداها سليم (نظام-انتروبيا أقل) وفى الآخر مهشم (عشوائية-انتروبيا أكثر) فإنك ستدرك على الفور أن الصورة الأولى قد التقطت قبل الثانية، إن هناك إحساسا غريزيا بقانون ازدياد الانتروبيا.

انزياح أحمر : أ- الانزياح الأحمر الكونى cosmological red shift إزاحة خطوط الطيف (ظ) نحو اللون الأحمر إذا كان الجسم المشع يبتعد عن المراقب، وهو ما تلاحظ

من رصد المجرات، مما تبين منه ظاهرة تمدد الكون (ظ: الكون المتمدد). ب- الانزياح الأحمر الجذبي gravitational red shift: مط الطول الموجي للضوء نتيجة مط الزمن في تشوه الزمكان بفعل جاذبية النجوم كبيرة الكتلة.

انزياح أزرق : blue shift لو أن جسما متجها ناحيتك وهو يشع الضوء، فإن الأشعة تتداخل في نفسها نتيجة للحركة، فتصير أقصر طولا. ولأن الضوء الأزرق أقصر في الطول من الأحمر، فإن الضوء يتغير لونه تجاه اللون الأزرق، ويسمى هذا التأثير انزياح أزرق (ظ: انزياح أحمر). يعتبر الانزياح الأزرق دليلا على انكماش الكون، كما أن الانزياح الأحمر دليل على تمدده.

تباعد : divergence متوالية يكبر مجموعها باطراد مع زيادة عناصرها، فيؤول مجموعها إلى مالا نهاية عندما يصل عدد عناصرها إلى مالا نهاية (قا: تقارب).

تحديدية : determinism مذهب علمي يرى أن كافة الظواهر في الكون تحكمها قوانين منضبطة تعطي نتائج محددة (قا: مبدأ اللايقين).

تطبيق : mapping إنتاج عناصر لفئة من عناصر فئة أخرى عن طريق عملية رياضية معينة (مثال إنتاج مربعات مجموعة من الأعداد بتطبيق عملية ضرب العدد في نفسه).

تفاضل وتكامل (علم) : calculus ظ: معادلة تفاضلية.

تفرع ثنائي : bifurcation انقسام في مسار مخطط بياني لنظام ديناميكي إلى فرعين.

تقارب : convergence متوالية يؤول مجموعها إلى قيمة محددة حين تصل عناصرها إلى مالا نهاية (قا: تباعد).

ثقب أسود : black hole منطقة من الزمكان لا يفر منه شيء حتى الضوء.

جيوديسي : geodesic أقصر (أو أطول) مسافة بين نقطتين على سطح معين، وتكون هي الخط المستقيم في الهندسة الإقليدية (ظ) لكونها تتعامل مع الأسطح المستوية، وبالنسبة للكرة (مثل الكرة الأرضية) هي قوس من دائرة.

حالة أرضية : ground state مستوى الطاقة الأدنى للإلكترون في مداره حول النواة.

حزام الكويكبات : asteroid belt ظ: كويكبات.

حشد : cluster تجمع من عدد هائل من النجوم (حشد نجمي) أو من المجرات (حشد مجرى) .

حشد أعظم : supercluster تجمع من حشود.

حشد محلى : local cluster الحشد المجرى الذى تقع فيه مجرتنا درب التبانة، يتكون من حوالى ٢٧ مجرة.

حضيض شمسى : perihelion أقرب نقطة من كوكب إلى الشمس.

خطية : linearity معادلة تمثل بخط مستقيم يمر بنقطة الأصل، وتتميز بأن التغيرات المتساوية فى المدخلات يقابلها تغيرات متساوية فى المخرجات، وينتج عن ذلك أن تطبيقها على عدد من العناصر يساوى تطبيقها على مجموع هذه العناصر (قا: لاخطية).

دورة محدودة : limit cycle مسار مغلق (مدار) محيط بمصدر (ظ).

رقم ليابانوف : Lyapunov exponent رقم يعطى معيارا لدرجة حساسية النتائج فى نظام ما للتغير فى الظروف الأولية.

سحابة كويبر : Kuiper belt حزام مذنبات خارج مدار بلوتو.

سرعة هروب : escape velocity السرعة المطلوبة للهروب من نطاق جاذبية جسم ما.

سعة الذبذبة : amplitude أعلى قيمة تصل إليها الذبذبة.

أشكال فاينمان : Feynman diagrams مخططات تمثل احتمالات نتائج تصادم الجسيمات الأولية، مكون من خطوط وأسهم، تنسب للفيزيائى ريتشارد فاينمان.

ظاهرة دوبلر : doppler effect التغير فى خطوط الطيف بحسب تحرك الجسم المشع بالنسبة للراصد، فإذا كان مقتربا تزاح الألوان تجاه اللون الأزرق (ظ: انزياح أزرق)، وإذا كان مبتعدا تكون الإزاحة تجاه اللون الأحمر (ظ: إنزياح أحمر)

عدد مركب : complex number يكون على الصورة س + ت ص، حيث ت = الجذر التربيعى للرقم –١ .

غبار كانتور: ظ: فئة كانتور.

فئة كانتور : Cantor set خذ خطا مستقيما، أزل ثلثه الأوسط، ثم كرر ذلك مع المستقيمين الباقيين، ثم كرر العملية إلى ما شاء الله. ما تصل إليه فى النهاية يسمى "فئة كانتور" أو "غبار كانتور".

فراكتال : fractal شكل يتميز بالتماثل الذاتى على مدى المقاييس المختلفة.

فضاء الطور : phase space مخطط يبين العلاقة بين متغيرات النظام فيما بينها، أو حالة الجسم فى كل لحظة من لحظات تغيره.

فوتون : photon جسيم الضوء، اقترحه آينشتاين لتفسير الظاهرة الكهروضوئية (انطلاق الإلكترونات من معدن عند سقوط الضوء عليه)، ويطلق الآن على الجسيمات الحاملة لقوة المجال الكهرومغناطيسي.

قانون بود : bode's law علاقة بين مسافات الكواكب حول الشمس مقدرة بالوحدات الفلكية (ظ) ينسب القانون إلى جوهان بود بينما واضعه هو جوهان تيتس .Johanne Titius

قصور ذاتى : inertia مقاومة الجسم المادى للتغير فى حالة سرعة حركته أو اتجاهها، يظهر تأثير القصور الذاتى حين تسرع بنا المركبات (نندفع للوراء) أو تبطئ (نندفع للأمام)، وكذا حين تغير من اتجاهه (نندفع عكس اتجاه الدوران).

كمية الحركة : monentum حاصل ضرب كتلة الجسم سرعته. معيار لمدى الطاقة الحركية لجسم متحرك، أو لمقدار قصورة الذاتى (ظ).

كوكبة نجمية : constellation مجموعة من النجوم تكون صورة سماوية، أو المنطقة التى توجد بها.

كونيات (علم) : cosmology علم نشأة الكون وتغيره مع الزمن

كويكبات : asteroids أجرام صغيرة للغاية تدور مع الكواكب فى المجموعة الشمسية، أغلبها بين المريخ وزحل، تمثل حزام الكويكبات.

لاخطية : non-linraritY علاقة رياضية لا تؤدى فيها التغيرات المتساوية فى المدخلات إلى نتائج متساوية فى المخرجات، مثال ذلك أن مضاعفة عدد ساعات الدراسة لطالب (بعد حد معين) لا يؤدى إلى مضاعفة التحصيل.

مـادة مـعتمـة : dark matter مـادة لا ترى بالعين ولكن العلماء يعتقدون بوجودها من آثارها.

مبدأ اللايقين : uncertainty مبدأ وضعه فرنر هايزنبرج، ينص على أنه بالنسبة للعـالم دون الذرى لا يمكن للقـوانين تحديد خصـائص الجسيمات كالسرعة والموضع تحديدا قاطعا، بل تعطى مجرد احتمالات لهذه الخصائص.

مجال كهرومغناطيسى : electromagnetic field أحد المجالات الأربع الرئيسية فى الطبيعة (ظ: القوى الأربع الأولية). يتكون من مجال كهربى ومجال مغناطيسى متعامدين، ينطلقان بسرعة فى الفراغ بسرعة ٣٠٠ ألف كيلومتر فى الثانية (سرعة الضوء). ظ: طيف كهرمغناطسي.

مجرة راديوية : radio galaxy ظ: مجرة نشطة

مجرة قضبية : barred galaxy مجرة حلزونية تتفرع من نواتها ما يشبه القضبان.

مـجـرة نشطة : active galaxy مـجرة تشع قدرا كبيرا من الطاقة (أساسا على صورة أشعة راديوية) ، تسمى أيضا: مجرة راديوية.

مـذنب : comet جرم صغير مكون من الثلج والغبار، حين يقترب من الشمس يكون له ذيل طويل.

مـعـادلة تفاضلية : differential function مـعـادلة تصف مـعدل تغير عنصر ما بالنسبة لتغير عنصر آخر (مثال: معدل تغير ضغط سائل مع تغير درجة حرارته)، ويعتبر العلم الذى يبحث هذا الموضوع هو علم التفاضل والتكامل.

مـعادلة فروق : difference equation مـعادلة غير متصلة، بل تدرس على صورة فترات من التغير (مثلا كل سنة).

معادلة لوجستية : logistic function معادلة فروق (ظ) تصف سلوك تعداد كائن داخل بيئته الطبيعية، حيث يكون بين عاملين، إيجابى هو معدل تكاثره، وسلبى هو معدل تناقصه نتيجة الافتراس من أعدائه الطبيعيين، وقد اتخذها روبرت ماى أساسا لدراسته عن الهيولية.

مفردة : singularity نقطة لا أبعاد لها ذات كثافة لانهائية، تعتبر بداية الكون طبقا لنظرية الانفجار العظيم، ونهايته طبقا لنظرية الانسحاق العظيم.

نابضـات : pulsars نظام نجـمى ثنائى (ظ) مكون من نجم نيـوترونـى (ظ) وثقب أسود (ظ).

نجم متغير : variable star نجم تتغير شدة إضاءته فى فترات دورية أو غير دورية.

نجم نيـوترونى : neutron star نجم مـتـهـاو تحت تأثيـر جـاذبيـتـه، تـهـشـمت الجسيمات فى داخله نتيجة جاذبيته الهائلة فتحولت إلى نيوترونات.

نظام (نجمى) ثنائى : binary stars نجمان يدوران حول بعضهما البعض.

نظام تشـتتى : dissipative system نظام تتبدد فيه الطاقة مع مرور الزمن (قا: نظام لاتشتتى).

نظرية المجـال : field theory نظرية تصـف تفـاعل الجـسـيـمـات مع المجـالات المختلفة.

نموذج خلطى : mixmaster model نموذج للكون يتضمن مطا وطيا للكون كما يحدث فى الخلاطات المنزلية.

هندسـة إقليـدية : Euclidean geometry هندسـة تجرد الأشكال إلى وحدات أولية مثالية كالخط المستقيم والدائرة حين ترسم على الأسطح المستوية، الهندسة المنسوبة إلى إقليدس وهو التى نعرفها فى المراحل الدراسية المعتادة (قا: هندسة غير إقليدية).

هندسـة غير إقليدية : non-Euclidean geometry هندسـة الأشكال على الأسطح غير المستوية.

وحدة فلكية : astronomical unit متوسط المسافة بين الأرض والشمس، وتبلغ ١٤٩ مليون و٦٠٠ ألف كيلومترا.

الفصل الأول

مقدمـــة

إن الكسوف الشمسى ظاهرة تأخذ بالألباب؛ قرص القمر يزحف رويدا رويدا ليحجب وجه الشمس، ومعه تسود الحلكة، إلى أن يحل الظلام الدامس مع ظهور الهالة الشمسية. وبقدر ما يثيره هذا الحدث من إعجاب، فإن تعجبا لا يقل قدرا يحمله الناس لمقدرتنا على تحديد وقت حدوثه؛ ولتمكن العلم من أن يتوقع مواضع الأجرام السماوية بقدر كبير من الدقة لسنوات عديدة آتية.

على أن الناس يعرفون أيضا أن هذه القدرة التنبئية للعلم ليست لكافة ظواهر الطبيعة، يشعر المرء بذلك من مجرد رفع النظر إلى سحاب يتراكم على صفحة السماء، أو مراقبة ورقة شجر تتأرجح متهاوية إلى الأرض. إن ما تبدو عليه مثل هذه الظواهر من عشوائية توحى بأن أية محاولة لتنبؤ لها حرى بها أن تصادف من الإخفاق أضعاف ما تصيب من صواب.

أليس عجيبا أن يتمكن العلم من التنبؤ بالنجوم فى أفلاكها بهذه الدقة المعجزة، ثم يقف عاجزا أمام ورقة شجر متساقطة، رغم كون الظاهرتين يخضعان لنفس القوانين الفيزيائية؟

إن حركات الأجرام السماوية وأغلب الظواهر الديناميكية الأخرى تخضع لقوانين نيوتن، أو بعبارة أعم لما يطلق عليه الميكانيكا الكلاسيكية. فما أن تعرف الظروف الأولية لجسم فى مجال قوة كالجاذبية مثلا، فإنه من حيث المبدأ تكون قادرا على أن تعرف ما سينتهى إليه فى أية فترة تحددها من المستقبل. ويطلق على هذا المفهوم "التحديدية" determinism، ويعنى أن الماضى يحكم المستقبل.

ولقد ظل العلماء لعهود طويلة على اقتناع بأن قضية التنبؤ بالنسبة لأى شىء فى الكون مرهونة بصفة أساسية بما يتاح من مقدرة على إجراء الحسابات، وبمعنى آخر،

فإن كافة الظواهر تحديدية. ولكننا نعرف اليوم أن هذا القول خاطئ من أساسه، فالتنبؤ بحركة غصين يسير وسط تيار متلاطم يخرج تماما عن نطاق قدراتنا التنبئية. وأيضا، وكما قد تتوقع، فإن التنبؤ بالطقس على المدى الطويل – ما ستكون عليه درجة الحرارة أو نسبة الرطوبة فى هذا الموضع بالذات من الأرض بعد شهر من الزمان مثلا – هو ضرب من المستحيلات.

بل إن بعض الظواهر التحديدية بطبيعتها قد تتأبى على ذلك عند تحقق ظروف معينة. فالبندول، والذى لفرط انضباط حركته قد استغل لقرون كأساس لصناعة الساعات، يمكن أن يدخل فى حالة من عدم الانضباط. اجعل ثقله من الحديد، وضع تحته مغناطيسين، وانظر إلى ما سينتاب حركته من اضطراب وتشويش.

وليس من عجب أن يظن الناس أن مثل هذه الظواهر عشوائية، ولكن الأمر ليس كذلك. فالتعريف العلمى لحالة الهيولية، وهى الحالة التى تحكم تلك الظواهر، يتضمن قدرا من التحديدية، وهو ما يميز حالة الهيولية عن حالة العشوائية الصرفة.

فمن الوجهة العلمية تعبر الهيولية عن الحساسية المفرطة للظروف الأولية، فتغيير طفيف فى نظام هيولى يؤدى إلى تغيير جذرى فى التصرف. فعلى سبيل المثال، لو أنك أسقطت غصينا فى مجرى مائى مضطرب، ثم أسقطت آخر على بعد سنتيمترات منه، فإن الأمر قد ينتهى بهما متباعدين بقدر كبير، بينما هما فى المجرى السلس للتيار يظلان على ما هما عليه من بعد، كحصانين يركضان متجاورين. إن الحالة الأخيرة هى تحديدية بلا شك، فكيف يطلق نفس الوصف على الأولى أيضا؟ إنها تحديدية بمعنى أنها محكومة بنفس القوانين، مما سيجعلها تتضمن نوعا خاصا من الانضباط كما سنرى فيما بعد.

وعلى الرغم من كون العديد من الظواهر الهيولية قد كانت واضحة منذ قرون، فإن العلم سار على افتراض أن ظواهر الطبيعة هى تحديدية تماما. ومع ذلك فقد كان معروفا أن بعض النظم هى تحديدية من الوجهة النظرية فقط، فهى أعقد من أن تعالج على أساس من تحديدية قاطعة. وأوضح مثال لذلك هو الغازات، فهى تتكون من بلايين الجزيئات، تتصادم فيما بينها آلاف المرات فى الثانية الواحدة. فمن الوجهة النظرية الصرفة يمكنك أن تصف سلوك الغاز تماما من دراسة سلوك كل جزيء على حدة بعد كل تصادم، بالضبط كما نفعل مع كرات البلياردو. وليس خافيا بالمرة وجه الاستحالة

فى تحقيق ذلك. وقد تلافى العلماء هذا القصور بوضع نوع جديد من العلوم، ألا وهو علم الإحصاء. فهذا العلم يعطى الاحتمال التقريبى بما يفى بالتعامل مع النظم فى مجموعها، وليس على مستوى التفاصيل الجزيئية، كما فى حالة الغازات.

ومع تقدم علم الإحصاء وجدت على الساحة العلمية نظريتان، التحديدية والإحصائية، الأولى تعالج تصرفات النظم البسيطة ذات العناصر المحدودة عددا، والأخرى للنظم المعقدة. كلتا النظريتين آتت أكلها جيدا، ولكن لم يكن من صلة بادية بينهما، فهما من الوجهة الرياضية مختلفتان تمام الاختلاف. ثم ظهرت فى العشرينات نظرية يطلق عليها "ميكانيكا الكم"، تتعامل مع الجسيمات دون الذرية كالإلكترونات والبروتونات، وتعالج تصرفاتها على أساس من "موجات الاحتمال".

أصبح بين يدى العلماء الآن ثلاث نظريات، ومن عجب أنه ما من واحدة منها قادرة على أن تعطى وصفا دقيقا لحركة الغصين السابح فى التيار المضطرب. على أن إرهاصات لنظرية تقوم بذلك بدأت تلوح فى الأفق، ولكن لم يقدر لها أن تبدأ النمو الحقيقى إلا مع مطلع الستينات. لم يقتصر تطبيقها على المسائل الفيزيقية مثل حركة الأشياء فى وسط مضطرب (كحالة الغصين المذكورة)، ولكن تجاوزت ذلك إلى فروع العلم المختلفة كالبيولوجيا والكيمياء والفلك، بل والاقتصاد. فالكثير من الاكتشافات التى أدت إلى ظهور النظرية الهيولية قد قام بها فى الواقع علماء متفرقون فى مجالات علمية متفرقة.

وتعتبر النظرية الهيولية اليوم بلا نزاع أهم الاكتشافات فى القرن العشرين، تقف على قدم المساواة مع النظرية الكمية والنظرية النسبية. وأكثر ما فى هذه النظرية إثارة أنها ليست مقصورة على النظم المعقدة، بل إن أبسط النظم، تلك التى توصف بمعادلة واحدة، يمكن أن تنتابها حالة الهيولية.

بدأت النظرية كعدة أفكار كان يظن ألا رابطة بينها، وبالتدريج أخذت تتكشف ملامح نظام عام يربط بينها، نظرية يمكنها تفسير ما يجرى فى فروع مختلفة من العلم.

وتعود بعض التقنيات الهامة للنظرية إلى الرياضى الفرنسى الشهير هنرى بوانكريه Henri Poincré، من علماء القرن التاسع عشر ومطلع العشرين، فهو يذكر بكونه آخر رجال التعميم العلمي، فمقدرته لم تكن قاصرة على مجال الرياضيات، بل كان

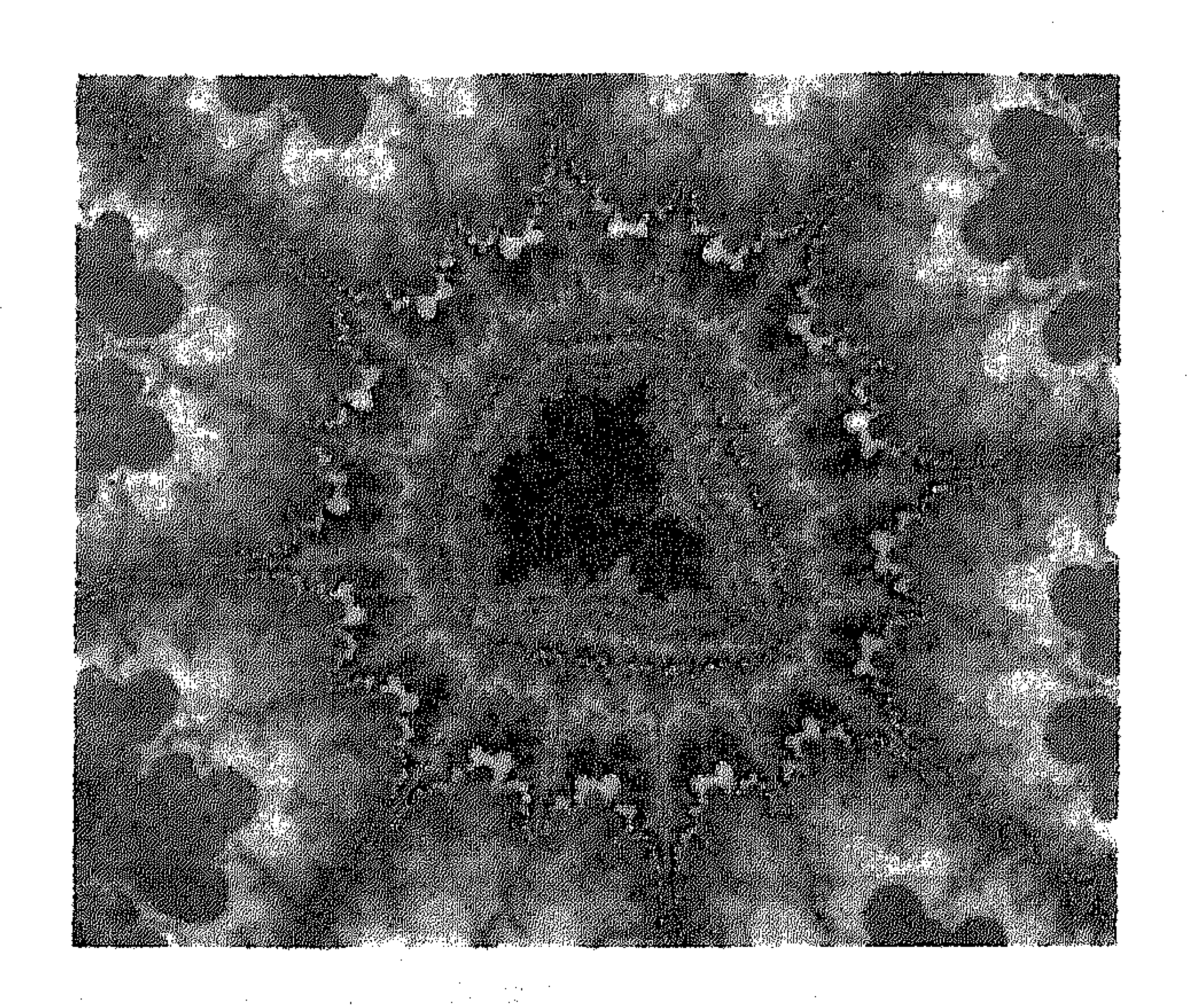
يخوض بها فى مجالات أخرى. ومن أهم مساهماته ما ذكرناه بالنسبة لقضية عدة أجرام متجمعة فى نظام تجاذبى واحد، أو بالأخص ثلاثة أجرام منها، وكيف بيَّن أنها أعقد مما كان متصورا لها. لقد وجد أن الحل الجبرى لها مستحيل، فتحول إلى الحل البياني. لقد ابتدع فضاء ذا أبعاد متعددة أسماه "فضاء الطور" phase space، تمثل فيه حالة النظام فى كل لحظة كنقطة فيه، وبذلك أمكنه أن يحول الأرقام إلى رسومات. بهذا الفضاء تمكن من أن ينظر إلى كافة احتمالات النظام فى نفس اللحظة. كان أسلوبا مستحدثا تماما، مكن من إعطاء رؤية نافذة لمثل هذه المسائل، ورغم أنه لم يكن حلا بالمعنى المألوف، فإنه قدم لبوانكريه مؤشرا لمدى تعقد المسألة التى هو بشأنها، الأمر الذى أدى به للتحول عنها.

وظل تعقيد المسألة عائقا عن تحقيق تقدم يذكر بشأنها إلى أن قام عالم الرياضيات الأمريكى ستيفن سمول Stephen Small فى الستينات ببيان أن النظم الديناميكية، (بتحديد أكثر حالة النظام النجمى الثلاثي) يمكن أن تفهم عن طريق الطى والمط لفضاء الطور، بالضبط كما يقوم الخباز بصناعة فطائره.

ومعاصرا لذلك كان ظهور الحواسب الإلكترونية، بطيئة ومتخلفة فى بداية عهدها بالنسبة لما هى عليه فى أيامنا هذه، ولكنها كانت هبة من السماء لمن يريد القيام بعدد كبير من العمليات الحسابية تفوق قدرة البشر اليدوية، فقد استغله إدوارد لورنز Edward Lorenz من معهد ماساشوستس للتكنولوجيا لوضع نموذج للطقس، وفيه رأى ما أدهشه. لقد وجد أن تغييرا طفيفا للغاية فى أحد عوامل الطقس يمكن أن يحدث آثارا خطيرة. لم يفهم لورنز وقتها السبب فى هذه الحساسية المفرطة، ولكنه استخلص من اكتشافه أن التنبؤ طويل المدى بالطقس أمر محال. وقد كان هذا فتحا مشهودا للنظرية الهيولية.

ويمكن لحالة الهيولية أن تكون على عدة صور، فالاضطرابات فى مجرى مائى مثلا إحدى صورها، فأحد الأسئلة التى شغلت تفكير كثير من العلماء فى مطلع هذا القرن كان يتعلق بنشوء الاضطراب ومصدره. وقد تعرض لهذا السؤال فى عام ١٩٤٤ العالم السوفيتى ليف لنداو، وقدم نظرية رأى أنها تجيب عليه، وفى عام ١٩٤٨ قدم إبرهارد نظرية مماثلة، ولسنوات ظلت نظرية ليندا و-إبرهارد هى النظرية المعتمدة علميا لتفسير حدوث الاضطرابات. وعام ١٩٧٠ بين وجه القصور فى هذه النظرية عالم

الرياضيات البلجيكى دافيد رول David Ruelle متعاونا مع زميله الدانيماركى فلوريس تاكنز Floris Takens خلال عملهما فى باريس. وبإدخال كينونة جديدة على فضاء الطور، أسمياها "الجاذب الغريب، أو العجيب" strange attractor تمكنا من شرح الاضطراب بطريقة أيسر بمراحل. وقد تحقق من صحة عملهما كل من هارى سوينى Harry Swinney من جامعة تكساس وجيرى جالوب Jerry Gollub من كلية هارفارد.



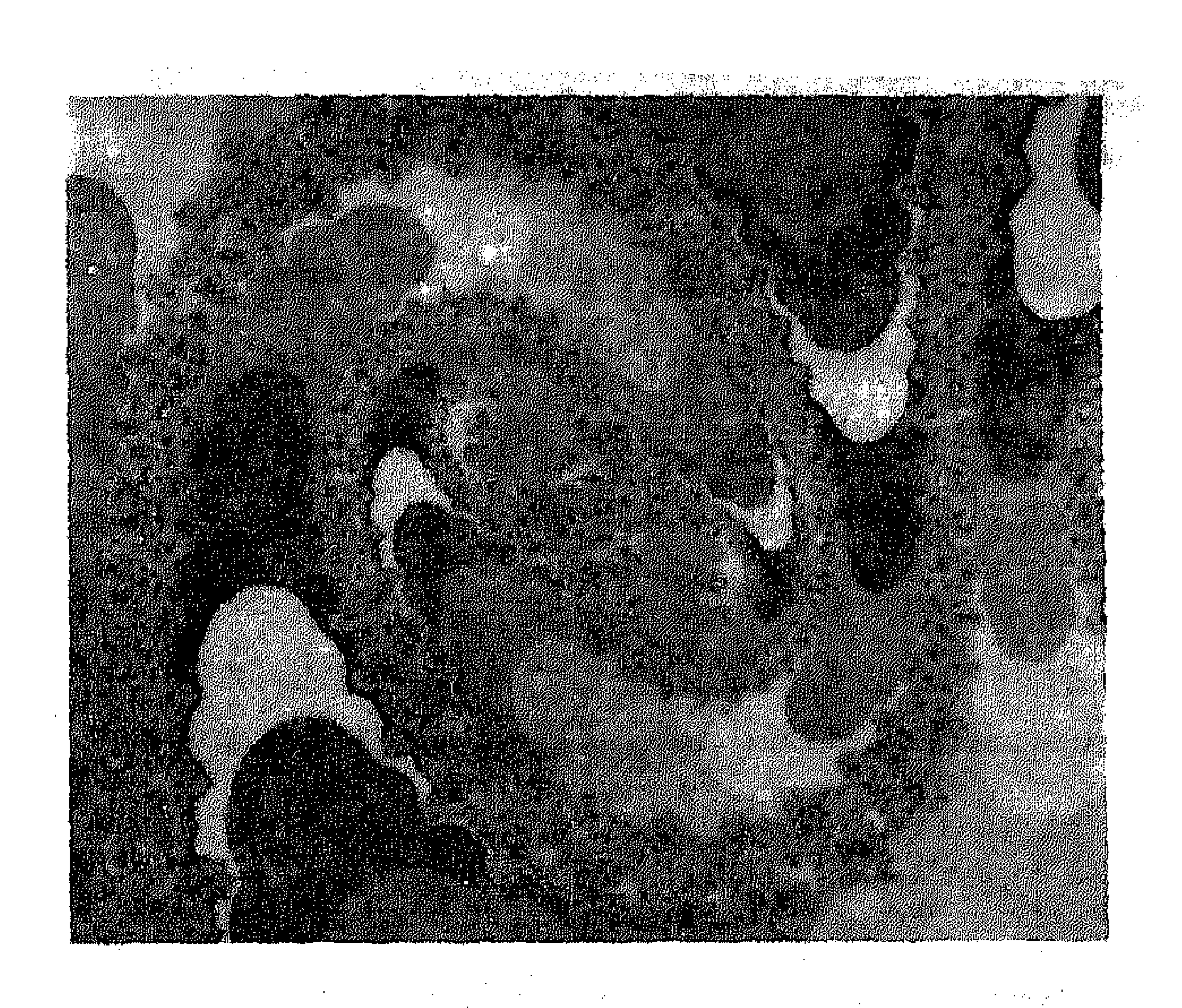
فئة ماندلبروت، أعقد شيء فى عالم الرياضيات، فى هذه الصورة يبدو أحد رجال الثلج التى تميز الشكل العام للفئة

ولكن كما سبق أن نوهنا، فالهيولية ليست مقصورة على النظم الفيزيائية، فقد بين روبرت ماى Robert May، من معهد الدراسات المتقدمة فى برنستون، أنها قد تنشأ أيضا فى النظم البيولوجية. فمن الأمور المعروفة تماما أن هذه النظم تبدى تغيرات حادة فى تعداد كائناتها. وقد وضعت معادلة يطلق عليها "المعادلة اللوجستية" logisic equqtion لنمذجة التغير فى التعداد، استخدمها ماى لشرح كيف يصبح التغير فيه هيوليا.

وتابع ميتشل فاينجنباوم Mitchell Feigenbaum من معمل لوس آلاموس اكتشاف ماي، واستطاع بآلة حساب يدوية أن يبين أن الهيولية ليست عشوائية كما ظن كل

إنسان بها، فالطريق إليها عام شامل فى كافة النظم بلا استثناء، بل ويتضمن رقما ثابتا عاما مرتبطا بالتحول إليها، يعتبر من أعجب ثوابت الطبيعة.

وبعد عدة أعوام تأسس رباط وثيق بين هذا التطور العلمى المثير وتطور علمى سار متوازيا معه، ولا يقل عنه إثارة، أطلق عليه "الفراكتالات" fractals وأشكال الفراكتال هى تكوينات هندسية متشابهة على كافة المقاييس، بمعنى آخر، كلما دققت النظر فى جزء منها بدا لك متشابها مع الشكل العام لها. وينسب الفضل عادة فى وضع نظرية الفراكتالات إلى بنوا ماندلبروت Benoit Mandebrot، فهو الذى وضع الاسم لها وقدم العديد من أفكارها الأساسية. بالإضافة إلى ذلك، فإنه قد استخدم الحاسوب فى إنتاج تكوين من أكثر التكوينات الملغزة وقعت عليها عين حتى اليوم، إذ يعتبر أعقد ما تضمن علم الرياضيات من أشكال، يسمى "فئة ماندلبروت" Mandelbrot set، ورغم ذلك فإنه ينتج من معادلة غاية فى البساطة ! إن هذه الفئة تتمخض عن أشكال غاية فى البهاء والجمال، سيرد العديد منها فى ثنايا هذا الكتاب. فى البداية لم يتصور أحد أن أشكال الفراكتل ذات علاقة بنظرية الهيولية، ولكن الصلة سرعان ما أصبحت واضحة.

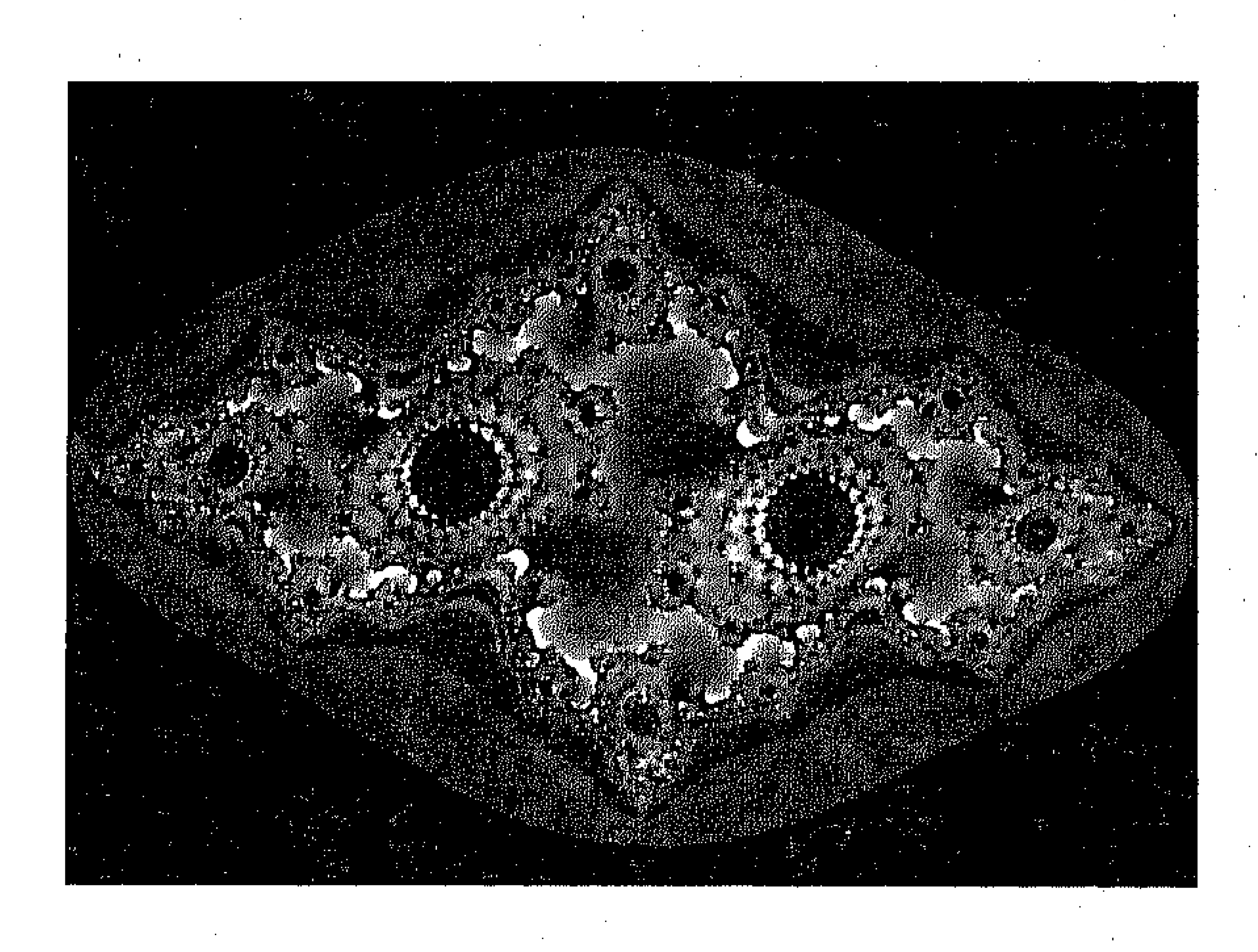


لقطة تفصيلية لفئة ماندلبروت

وقد دخلت نظرية الهيولية فى علم الفلك ببطء، وقد وضع بوانكريه الأفكار المبدئية بطبيعة الحال، ولكن الأمر لم يتحرك بعده شيئا مذكورا إلى نهاية السبعينات، حين شغل جاك ويزدوم Jack Wisdom من جامعة كاليفورنيا نفسه بموضوع الفجوات داخل حزام الكويكبات، هل هى نتيجة حالة هيولية ؟ كان الاحتمال غير مستبعد، وقد ابتكر ويزدوم تكنيكا بيّن به أن أحد هذه الفجوات، وربما هى جميعها، نتاج لهذه الحالة بالفعل.

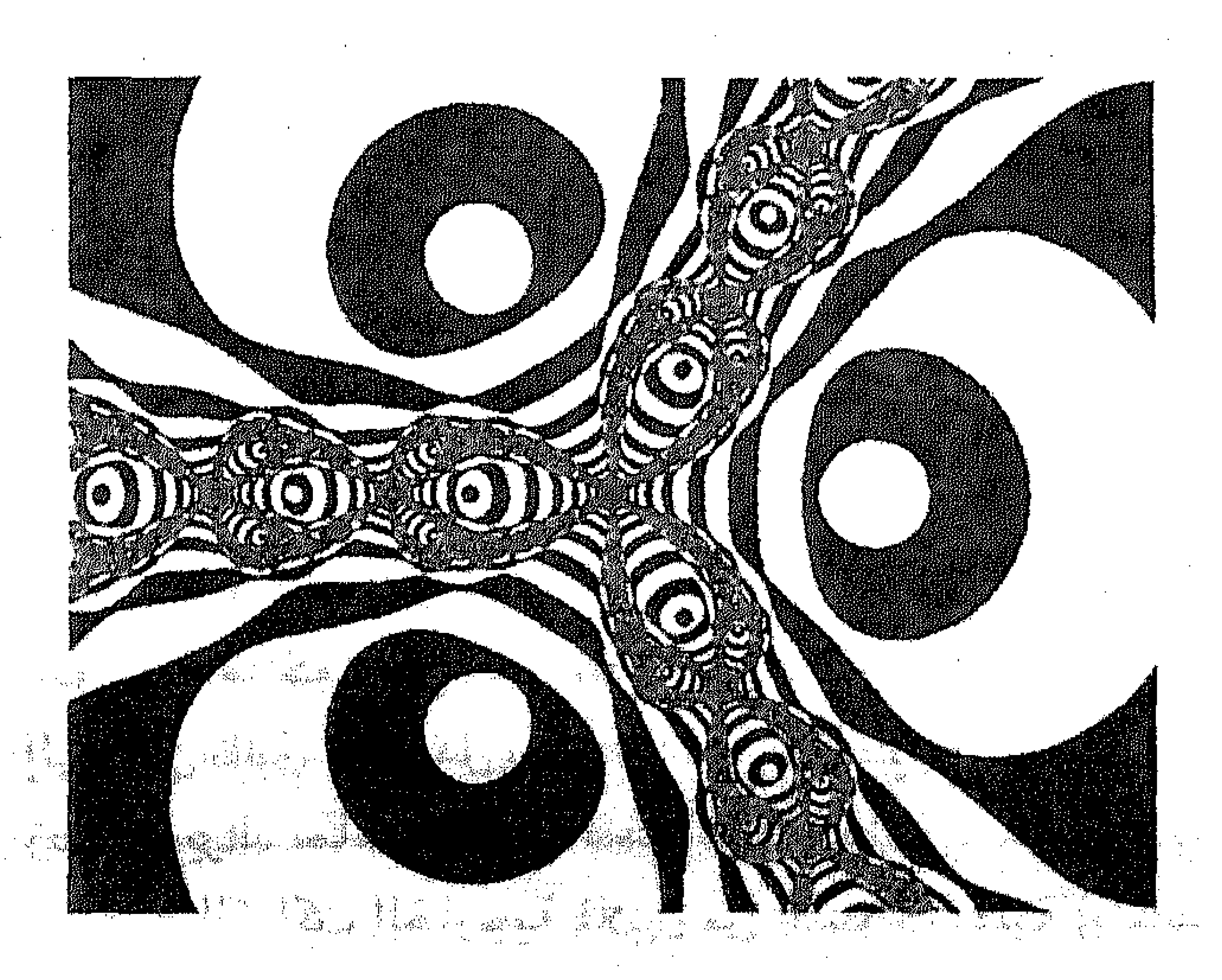
وبدأ ويزدوم مع آخرين ينظرون إلى أجرام سماوية أخرى، وكان المرشح الأكثر وضوحا هو هيبريون، أحد أقمار زحل. فالصور من مركبة فوياجير الفضائية أظهرت شذوذا واضطرابا فى حركته، ونظر ويزدوم فى احتمال أن يكون هذا الاضطراب هيوليا.

تأتى بعد ذلك الكواكب السيارة، وحركتها بلا أدنى شك تحديدية تماما، فهى على قدر علمنا تدور فى أفلاكها على مدى القرون الماضية فى انضباط بما يوحى بإمكان التنبؤ بها إلى قرون تالية، ولكن هل يمكن أن يظهر التحليل المستقبلي لها حالة هيولية ؟ لقد بنى ويزدوم وجيرالد ساسمان Gerald Sussman حاسوبا خاصا لدراسة الموضوع، وتتبعوا به حركات الكواكب الخارجية لملايين من السنوات الآتية (والماضية)، وخرجوا بنتائج مذهلة.



أحد أشكال فئات جوليا

وبينما انشغل العالمان بالكواكب الخارجية، كان الفلكى الفرنسى جاك لاسكار Jack Laskar يدرس حركة الكواكب الداخلية، وتوصل أيضا إلى نتائج مذهلة، ثم سرعان ما انخرط آخرون فى هذه الأبحاث.



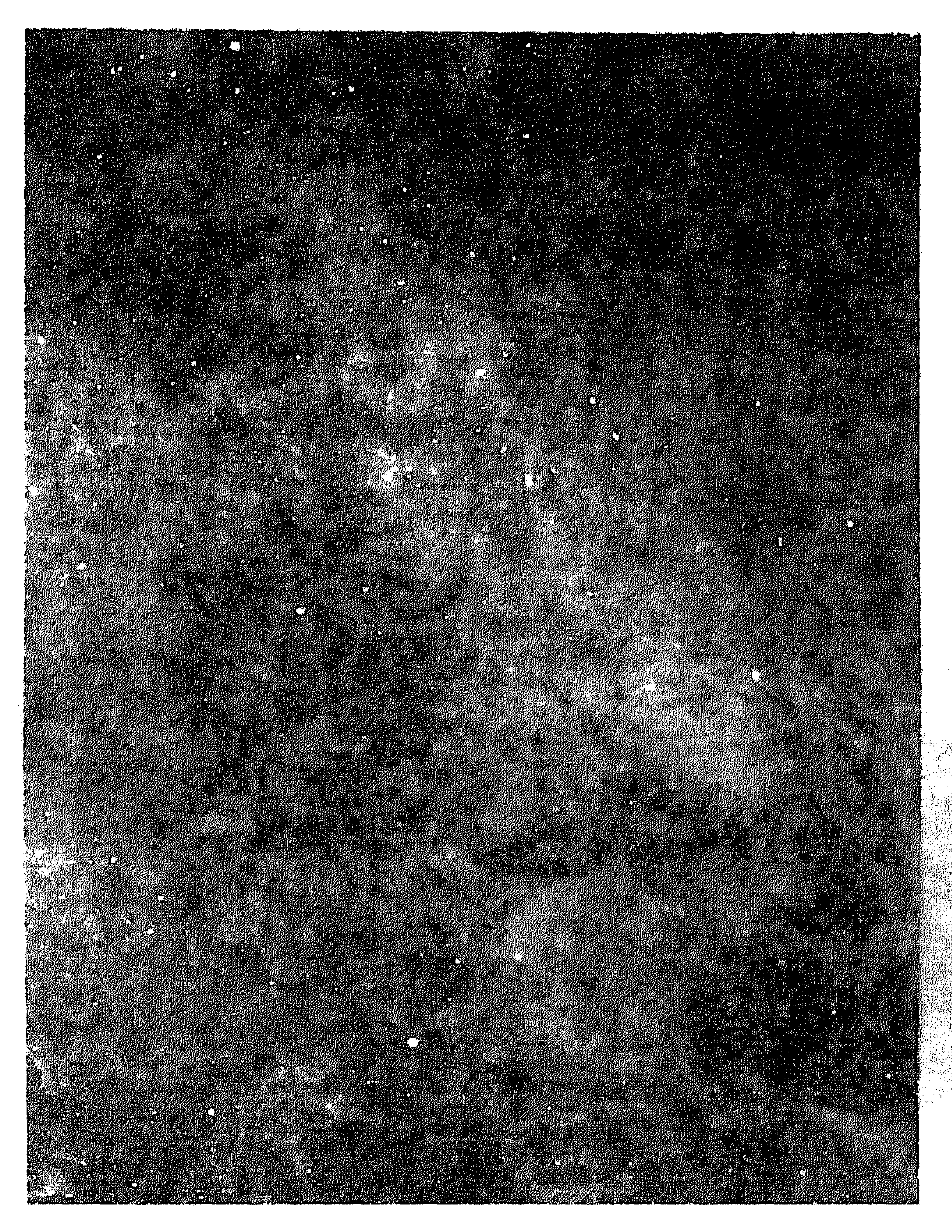
الهيولية فى حل أحد المعادلات

ولكن إذا كان النظام الشمسى يحمل ظاهرة هيولية، فما بال النجوم الأخرى ؟ كانت النجوم النابضات (البلسارات) هى أفضل مرشح للنظر فى هذا الاحتمال، هل من الممكن أن تخرج نبضاتها عن الانضباط وتدخل فى حالة هيولية ؟ درس هذا الاحتمال أيضا.



الكواكب السيارة والأقمار، المشترى فى الخلفية

ثم جاء دور البحث فى النظم النجمية الثنائية، ومن أشهر أمثلتها النظام Her - X-1 الذى يمثل مصدرا قويا للإشعاع السينى يعرف عنه الارتباط بنجم نيوتروني. بحث العديد من العلماء عن احتمال الهيولية فى هذا النظام، وفى نظام آخر هو الدجاجة س-١ الذى يعرف عنه الارتباط بثقب أسود



حقل من الانجوم في السماء،

البعض منها قد يكون فى حالة من الهيولية

ونُظِر أيضا فى حالة النجوم السيارة فى قلب المجرات، فبالضبط كما يحتمل أن تكون حركة الكواكب السيارة للنظام الشمسى هيولية، فكذلك النجوم، وقد تركز الاهتمام مؤخرا على المجرات القضيبية، وهى المجرات التى تحتوى على هياكل قضيبية فى مراكزها.

وقد تبين فى بداية الأمر أن الحالات الهيولية مرتبطة بأنواع معينة من المعادلات الرياضية المشهورة بتعقدها، تسمى المعادلات اللاخطية، وكان من المنطقى النظر فى أشهرها على الإطلاق، معادلة آينشتاين، وتجرى الأبحاث حاليا على معرفة أثر اللاخطية على النظرية النسبية العامة، ويبدو أن الهيولية تلعب فى الأمر دورا ذا شأن، كما اتضح أيضا ارتباطها بالدوران حول الثقوب السوداء.

ومعادلات آينشتاين هى أيضا أساس لعلم الكونيات ودراسة ميلاد الكون، ويوجد نموذج ذو أهمية خاصة فى هذه الدراسة يسمى "النموذج التذبذبى الخلطي" لكونه مؤسسا على مذبذب خالط (يشبه ما يصدره الخلاط المنزلى من ذبذبات)، مثل هذه الذبذبات يحتمل أن تكون قد نشأت فى فترة ميلاد الكون، كما يحتمل أن تكون هيولية.

ثم تأتى النظرية الكمية التى تتعامل مع الذرات والجزيئات، وهى تلعب أيضا دورا هاما فى الدراسات الفلكية. فنحن نعلم أن الهيولية تحدث فى نطاق الميكانيكا الكلاسيكية، ألا يحتمل أن تحدث أيضا فى العالم الذرى الذى تصفه نظرية ميكانيكا الكم ؟ سوف نبحث هذا الاحتمال فى أحد فصول الكتاب المتأخرة.

وفى النهاية، لقد كان أملا للبشرية فى السنوات الماضية الوصول إلى نظرية شاملة، تصف كل شيء عن الطبيعة، فما دور الهيولية فى صياغة نظرية كهذه ؟ سوف نعرض لهذه المسألة أيضا.

وقبل أن نخوض فى تأثير الهيولية على الفلك، علينا أن نعرف المزيد عن النظرية ذاتها، وهو ما نتناوله فى الفصل القادم.

الفصل الثانى

الكون كساعة منضبطة

على مدى السنوات تمت صياغة إجراءات تهدف إلى تحديد موضع وسرعة الأجسام عند تحركها تحت تأثير القوى، تعرف حاليا بالميكانيكا الكلاسيكية. طبقا لهذه النظرية يمكن معرفة المستقبل لأى جسم من معرفة ظروفه الحالية من موضع وسرعة، وطبيعة القوى المؤثرة فيه. فالنظم الكلاسيكية تتصرف بأسلوب تام الانضباط، ومستقبلها يمكن توقعه بتطبيق بعض المعادلات الرياضية. فالكون بدا أنه تحديدى بصورة قاطعة، وسوف نعرض فى هذا الفصل لنشأة هذه الصورة عن الكون.

كوبرنيكس، كبلر وجاليليو

كانت الأرض على مدى الآلاف العديدة من السنين من سكنى الإنسان لها تتبوأ مركزا متميزا. فكافة أجرام السماء تدور حولها، وكل شيء خاضع لها. لقد كان النموذج المستقر هو نموذج بطليموس، والمؤيد بتعاليم الكتاب المقدس.

ولكن حين وجه الفلكيون أبصارهم للسماء، وجدوا أمورا يصعب تفسيرها بناء على هذا النموذج الذى وضعت فيه الأرض مركزا للكون. فعلى مدى العام تتحرك الكواكب السيارة فى اتجاه معين بالنسبة للنجوم، ولكنها على فترات معينة تتوقف، ثم تعود القهقرى، ثم تتوقف ثانية، لتستأنف حركتها بعد ذلك. هذه الحركة التقهقرية حيرت الألباب، استلزم لفهمها إدخال فكرة "فلك التدوير" epicycle، وهى أفلاك صغيرة تدور حول أفلاك أكبر، مركزها الكرة الأرضية.

كان نموذجا معقدا، زاد من سوئه أن الفلكيين وجدوا أن فلك تدوير واحد ليس كافيا، فهم محتاجون لأفلاك تدوير متداخلة لإمكان تفسير هذا الشذوذ فى المسارات. ومن ثم فقد ثار التساؤل عن احتمال أن يكون ذلك تصويرا خاطئا للطبيعة. لم يكن

بطليموس واثقا من الإجابة، ولكن نموذجه ساعد فى التنبؤ بحركات الكواكب وأوقات الخسوف لعدة سنوات قادمة.

وظل النموذج البطلمى سائدا لعدة قرون، إلى أن جاء نيكولاس كوبرنيكس Nicolas Copernicus. ورغم إعجابه بمدى تكامل النظام، إلا أنه كان منزعجا لما عليه من تعقد. هل هذا التعقد مطلوب حقا؟ لقد بدا له أن الطبيعة بإمكانها أن تجد حلا أكثر بساطة بكثير. ربما يبدو الكون أكثر تعقيدا بسبب خطأ تصوره من جانبنا!



نيكولاس كوبرنيكس

ولد كوبرنيكس فى بولندا عام ١٤٧٣ وتلقى تعليمه الدينى فى جامعات كراكرى وبولونيا وبادو، وبالإضافة إلى ذلك تلقى دروسا فى الرياضيات والفلك، وسرعان ما أصبح مشدودا لأفكار الفيلسوف الإغريقى العظيم بطليموس.

وبعد دراسة مستفيضة توصل إلى فكرة أن صعوبات النموذج الذى وضعه بطليموس تتلاشى لو أننا وضعنا الشمس فى مركزه بدلا من الأرض؛ فيمكن على وجه الخصوص الاستغناء عن فكرة أفلاك التدوير بتصور أن الكواكب الداخلية تتحرك أسرع من الخارجية. إن الأمر أشبه بقطارات تتحرك فى مسار دائري، فراكب القطار الأسرع حين يقترب من قطار أبطأ يراه متحركا للخلف، وما أن يتجاوزه حتى يراه متحركا فى نفس اتجاهه.

والكواكب حين نراقبها من الأرض يحدث نفس الشيء. فالأرض وهى بسبيلها لأن تتجاوز كوكب المريخ يبدو لنا متحركا للخلف، ثم ما يلبث أن نراه مستأنفا مسراه المعتاد.

وحين وضع كوبرنيكس نموذجه وجد أنه أكثر بساطة ورشاقة من نموذج بطليموس، ولكن للأسف لم يكن قادرا على الاستغناء عن فكرة أفلاك التدوير، وأكثر من ذلك لم يكن يعطى تنبؤا أفضل مما يعطيه النموذج الآخر بالنسبة لحركات الكواكب، وعلى الرغم من ذلك فقد كان مقتنعا به أشد الاقتناع.

كان كوبرنيكس صغير السن نسبيا حين بدأ التفكير فى نموذجه، ربما لم يتجاوز الأربعين بعد، وكان يعلم أن نموذجه لم يكن ليتقبل بقبول حسن من رجال الكنيسة، فهو ينزل الأرض عن مركزها المتميز، جاعلا منها مجرد تابع من توابع الشمس التى تبوأت بدلا من الأرض مركز الصدارة. ومن ثم فقد احتفظ بأفكاره لنفسه، ولكن بمرور الوقت زاد اقتناعه بها فأخذ يوزع نشرات موجزة عنها بين البعض من أصدقائه، وقد بلغ إعجاب أحدهم بها لدرجة أن شجعه على نشرها، على أن كوبرنيكس لم يبادر إلى الأخذ بهذه النصيحة، عالما عواقبها، إلا حين بلغ السبعين، ولم يظل أمامه من العمر الوقت الطويل.

لم يتح لكوبرنيكس أن يرى سوى نسخة واحدة من الكتاب، جاءه وهو على فراش الموت، ولم يثر الكتاب انتباها فى بداية الأمر، فأفلاك التدوير لا تزال مطلوبة له، ولم يكن لتطبيقه أية ميزة على النموذج البطلمي. وشيئا فشيئا أخذ يجذب الأنظار إليه.

وكان الفلكى الألمانى جوهانس كبلر Johannes Kepler من أكثر من أعجب بنموذج كوبرنيكس، ولد كبلر فى فيل عام ١٥٧١، كانت حياته مليئة بالمصاعب والمآسي، فقد كان معتل الصحة ضعيف الثقة بالنفس، ولكنه كان عبقريا متوقد الذهن، ورياضيا من الطراز الأول، قام باكتشافات وضعته فى مصاف المشاهير من العلماء.



جوهانس كبلر

كان كبلر مقتنعا من وقت مبكر للغاية بأن حركات الكواكب تخفى ميكانزما غاية فى الدقة، لو فهم حق الفهم لمكَّن من التنبؤ بمواضعها لسنوات عديدة قادمة. كان يشعر بأنه على قيد أنمله من ذلك الفهم، فكل ما يحتاج إليه بيانات مستفيضة عن حركات الكواكب. كان الشخص الذى تحت يديه هذه البيانات هو تيكو براهى Tycho Brahe، يعمل فى ذلك الوقت فى قلعة بيناتك بالقرب من براغ.

كمثل كوبرنيكس، كانت دراسة كبلر موجهة لتقلد منصب ديني، ولكن سرعان ما اكتشف الجميع أنه غير مؤهل لهذا المجال. كانت موهبته الرياضية قد تفجرت، فنصح أن يتجه للتدريس، وهو ما قام به بالفعل، وما ندم عليه أيضا. لقد كان ضعيف السيطرة على تلاميذه، وانتابته حالة من البلبلة والإحباط، بالإضافة إلى سيطرة مسألة الكواكب على ذهنه طوال الوقت، حتى غدا ينظر إلى مهنة التدريس كعائق لمستقبله.

كما أن الضجيج الدينى من حوله كان يمثل خطرا عليه، فعلم أنه لا بد له من الرحيل. وتلقى ذات يوم خطابا من براهى الذى قرأ كتابا له، وبلغ من إعجابه به أن عرض عليه عملا كمساعد له. وطفر قلب كبلر فى صدره فرحا، فهى فرصة له للتوجه كلية إلى الفلك، والأهم من ذلك أن بيانات براهى ستكون تحت يديه.

وحزم أمتعته فى فبراير عام ١٦٠٠ وتوجه مع عائلته إلى القلعة المقصودة. كان الطريق شاقا، ولكن فرحة كبلر الغامرة هونت عليه المشقة، لقد كان واثقا من أنها نقطة التحول فى حياته. وتبين أن براهى نفسه كان شغوفا بلقائه. لقد كان فى نزاع مع شخص آخر حول "النظام الكوني"، وكان يأمل أن يكون كبلر عونا له فى ذلك الخلاف. كان نظامه مختلفا عن كل من نظامى كوبرنيكس وبطليموس - يجمع بينهما فى نظام مركزه الشمس. الكواكب تدور حول الشمس، ولكن الشمس تدور حول الأرض. كان براهى محتاجا لكبلر، ولكنه كان يخشى منه، عالما أن لديه إمكانات يمكن أن يطغى بها عليه، وكان متحيرا كيف يتعامل معه.

تبخرت أحلام كبلر الوردية بمجرد لقائه ببراهي، إذ كانا شخصين مختلفين تماما، ووجد كبلر أنه من المستحيل التعامل مع الشخص الذى كان شغوفا للقائه. لقد كان متعجرفا لا يطاق، محاطا دائما بالطلاب والمريدين والمتملقين، واشتدت خيبة أمله بصورة أكبر حين علم أن براهى لم يكن ليسمح له بالاطلاع على بياناته، ودب الشقاق بين الرجلين إلى أن حزم كبلر أمتعته مرة أخرى مهددا بالرحيل، ولكن براهى أقنعه أخيرا بالبقاء.

كان كبلر حازما، فليست مسألة الكواكب أمرا يتخلى عنه ببساطة، وكان واثقا من إمكانياته فى حلها لو أتيح له الاطلاع على البيانات. وأتيحت له الفرصة فى غضون العام، لقد سقط براهى صريعا إثر الإسراف فى الشراب فى حفلة ملكية، وورث كبلر كل شيء.

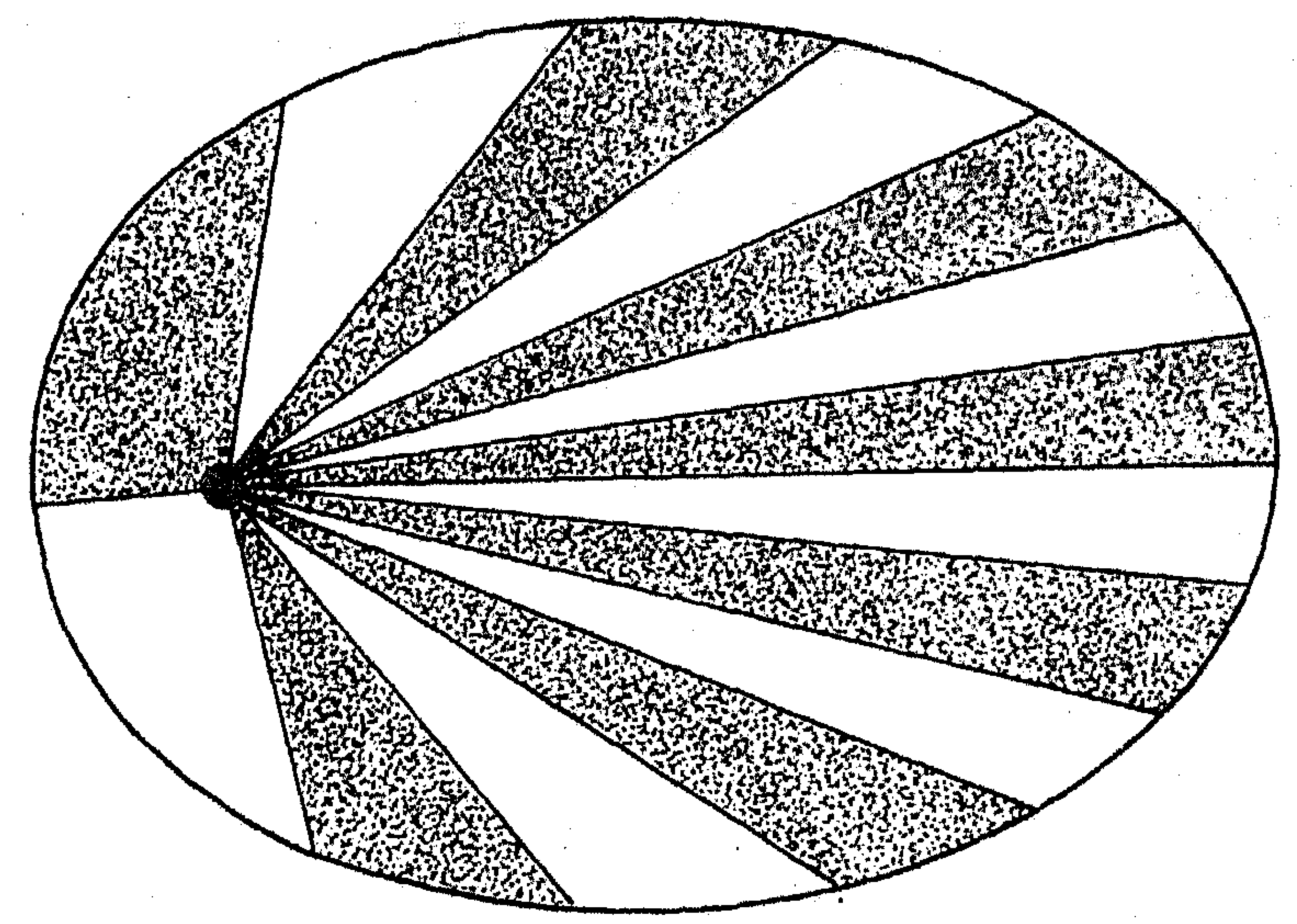
"لا تدع حياتى تضيع هباء"، هكذا تضرع براهى لكبلر، حاثا إياه أن يستخدم بياناته للبرهنة على نظامه. وعلى الفور أعلن كبلر "الحرب على المريخ"، كما وصف مهمته. لقد ظنها تستغرق أسبوعا، أو ثمانية أيام على الأكثر، ولكن بعد ثمانى سنوات كانت الحرب لا تزال دائرة.

لقد نشر أعماله فى كتابين، يعطيان رؤية كاملة عن شخصيته. كان لا يكتب فقط عما توصل إليه، ولكن عما واجهه من صعوبات وإحباطات. كان قاسيا على نفسه فى النقد، متهما إياها بالغباء فى بعض الأحيان أن فاتته أمور كان المفروض أن تكون واضحة له. ولكن وسط هذا الحديث المسترسل دفنت ثلاث جواهر قيمة، تعرف بقوانين كبلر الثلاثة.

ينص قانون كبلر الأول على أن الكواكب لا تدور فى مدارات دائرية، بل إهليلجية (بيضاوية)، يقول كبلر إنه قد حاول مع الدائرة سبعين مرة، لم تعط مرة واحدة منها نتائج مقبولة إلى أن تخلى عنها قانطا. وحين تحول إلى الشكل الإهليلجى واضعا الشمس فى إحدى بؤرتيه، وجد الإجابة على الفور.

وتجلت عبقرية كبلر بصورة خاصة فى قانونه الثاني، لقد اكتشف ببصيرة غير عادية أن الكواكب لا تتحرك بسرعة ثابتة فى مسارها، بل بطريقة تجعل الخط الواصل بينها وبين الشمس (يسمى "المتجه الشعاعى radius vector") يمسح مساحات متساوية فى الأزمنة المتماثلة.

أحد نتائج القانون الثانى لكبلر أن الكوكب حين يكون فى أقرب نقطة من الشمس (تسمى "الحضيض الشمسي، أو نقطة الرأس" perihelion تكون سرعتها أقصى قيمتها، وحين تكون فى أبعد نقطة منها (تسمى "نقطة الذنب" aphelion) تكون فى أدنى قيمة لها. وفيما بين النقطتين، تتغير سرعة الكوكب صعودا وهبوطا.



تمثيل لقانون كبلر الثانى

يمسح الشعاع الواصل من الكواكب للشمس مساحات متساوية

فى أزمنة متساوية

من السهل الآن أن تعرف أية مشاكل كانت تواجه نظام كوبرنيكس، فعلى الرغم من كونه قد طبق الفكرة الصحيحة بوضع الشمس فى مركز النظام الشمسي، إلا أنه احتفظ بصورة المسارات الدائرية وسرعة التحرك الثابتة. هذا ما أجبره على الاحتفاظ بفكرة أفلاك التدوير.

ولقانون كبلر الثالث مسحة رياضية، فهو ينص على أن مربع زمن دورة كل كوكب حول الشمس يتناسب طرديا مع مكعب مسافته المتوسطة عن الشمس. وسوف نرى لاحقا كيف كان لهذا القانون الفضل فى تعديل نيوتن لقانونه عن الجاذبية.

ولا تزال قوانين كبلر أساسا راسخا لعلم الفلك، لا يقتصر تطبيقه على النظام الشمسي، بل على الأنظمة الفلكية الأخرى كالنجوم الثنائية والنجوم النيوترونية والثقوب السوداء وأعقد أنظمة نجمية فى السماء، المجرات. فكبلر هو أول من بين الانضباط فى ديناميكية الحركات الفلكية، وهى خطوة هائلة إذا أخذنا فى الاعتبار أن أغلب قوانين الفيزياء لم تكن قد اكتشفت بعد. وبذلك فقد لعب دورا حاسما فى الأخذ بنموذج كوبرنيكس الذى يجعل الشمس مركزا للنظام الشمسي.

وسارت الحياة بكبلر بعد ذلك من مأساة إلى أخرى، إذ فقد وظيفته فى القلعة، وبينما هو مرتحل إلى راتسبورن على صهوة جواد لاستلام مستحقاته المالية خر مريضا مرض الموت، وكان عمره حين وفاته ثمانية وأربعين عاما.

كان التلكسوب قد اكتشف إبان حياته، ولكن لم تتح له فرصة استخدامه. لقد كتب إلى جاليليو سائلا أن يصنع له واحدا، ولكن الأخير اعتذر بضيق الوقت، خشية منافسته له.

ولد جاليليو فى بيزا بإيطاليا عام ١٥٦٤، وبدأ حياته كدارس للطب، ولكن سرعان ما مل الدراسة. ففى هذا الوقت لم تكن الكنيسة تسمح لأحد أن يعمل مشرطا فى جسد آدمي، فلم يكن معروفا من علم التشريح إلا النذر اليسير. وتحول أخيرا إلى الدراسة الحرة لعدة سنوات، صمم خلالها بعض الأجهزة الباهرة، إلى أن جذب اهتمام أحد النبلاء فوجد له وظيفة فى جامعة بيزا. وقام بالتدريس عدة سنوات فى علمى الرياضيات والفلك، وكان ذا شعبية بين تلاميذه. وحين بدت آثار ما جرته عداوته مع الكثيرين، وجب عليه الرحيل، ولكنه حصل على وظيفة أفضل فى جامعة بادوا، حيث قضى الثمانية عشر عاما التالية.

وعند بلوغه الخامسة والأربعين كان قد أضحى عالما محترما، ومدرسا مشهورا، وصديقا للنبلاء. كل ذلك لم يكن كافيا بالنسبة لجاليليو، كان يتطلع للمزيد، وجاءت فرصته خلال زيارته لمدينة البندقية، حيث سمع عن جهاز بصرى يقرب المسافات البعيدة، فأسرع عائدا إلى بادوا حيث صنع واحدا ذا قدرة تقريب ثلاثية، سرعان ما زادها إلى ثلاثين. كانت نقطة تحول فى حياته.



جاليليو

لم يكن هو من اخترع التلكسوب، ولكن يرجع إليه الفضل فى جعله أداة للبحث العلمي. لقد أداره تجاه السماء، وأخذ يميط اللثام عن أسرارها شيئا فشيئا. لقد رأى تجاعيد القمر، وأوجه الزهرة، وأقمار المشترى، ولاحظ أن السماء تحتوى على أعداد غفيرة من نجوم لا ترى بالعين المجردة. وحين نشر اكتشافاته فى كتاب بعنوان "The Starry Massenger"، طبقت شهرته الآفاق على الفور.

كان مقتنعا تماما بنظام كوبرنيكس، وعالما بموقف الكنسية من هذا الموضوع، ولكن بوجود التلكسوب تحت يديه كان قد بين بصورة قاطعة صدق هذا النموذج، ووجدها فرصة لإثبات رأيه، معتقدا أن ما له من شهرة كفيل بأن يساعده على ذلك.

ولكن كان عليه انتظار الفرصة المواتية، وقد سنحت له عام ١٦٢٣، حين جلس على الكرسى البابوى صديق له هو الكاردينال باربريني. كان باربرينى مثقفا ذا شغف بالعلوم، فهرع عليه عارضا قضيته، واثقا من قدرته على إقناعه بها. ولكن باربرينى تناول الأمر بحذر، طالبا منه انتظار المزيد من البراهين.

وكان جاليليو متأثرا بحسن استماع البابا، وبدلا من انتظار المزيد من البراهين، شرع فى نشر كتاب بعنوان "حوار حول نظامين أساسيين للعالم"، بذل فى تنقيحه أربع سنوات إلى أن أخرجه فى صورته النهائية. كان إخراج الكتاب على صورة حوار بين ثلاثة من الفلاسفة: سالفياتو، أكثر الثلاثة ذكاء والمتحدث باسمه جاليليو، وساجريدو، أيضا له من الذكاء ما يجعله يقتنع برأى الأول، وسمبليتشيو، ساذج وعنيد كما يوحى اسمه، يستخدم نفس المنطق الذى واجهه به البابا.

حين قرأ البابا الكتاب استشاط غضبا، فأمر على الفور بمصادرته واستدعاء جليليو لمحكمة التفتيش. لم يتعرض للعذاب، ولكنه هدد إلى أن كتب اعترافا بذنبه وتعهدا بالتراجع عن آرائه، ثم اعتقل فى منزله إلى وفاته عام ١٦٤٢.

كان تعهد جاليليو بألا يعود للتحدث عن نموذج كوبرنيكس، ولم تكن له فى الواقع فرصة لأن يفعل، ولكن فى السنوات الثمانى قبل وفاته تمكن من كتابة أعظم كتبه "حوار بخصوص نظامين جديدين للعلم". فى هذا الكتاب تكلم عن القصور الذاتي، واصفا له على أنه ميل الأجسام لمقاومة التغير فى حركتها، وهو من المفاهيم الراسخة فى العلم فى أيامنا هذه. كما بين أنه حين تهمل مقاومة الهواء، فإن كافة الأجسام تسقط بنفس المعدل، وأن قذيفة من مدفع تبلغ أقصى سرعة لها حين توجه بزاوية ٤٥ درجة. إلا أن أعظم إنجاز له هو إدخال المنهج العلمى المؤسس على التجربة.

على أن قوانين الطبيعة الأساسية لم تكن قد كشف عنها القناع بعد، وكان إدخال كبلر الرياضيات فى قوانينه لا يمثل منهجا سائدا، إلا أن الوقت قد حان لذلك، وفى نفس عام وفاة جاليليو، ولد إسحق نيوتن فى وولزثورب بإنجلترا. كان إدخال الرياضيات فى العلم مقدرا أن يكون على يديه، ويتغير بذلك وجهه إلى الأبد.

نيوتن وإدخال الرياضيات فى العلم

ولد نيوتن طفلا عليلا لأرملة فى قرية وولزثورب، تزوجت بعد ميلاده فكفلته جدته. كان يحب العزلة، ويلهو بمفرده ببناء طواحين الهواء والساعات البسيطة والمزولات الشمسية. كانت عبقريته واضحة آنذاك، ولكن لم تثر انتباه أحد. كنت تراه وقت الفصل غير منتبه وغارقا فى أحلام اليقظة، ولكن عندما يحين وقت الامتحان تراه يلتهم المقررات فى بضعة أيام، فيبز بقية زملائه، وبسبب ذلك كان غير مقرب من أقرانه.

بعد حين أعادته والدته إلى القرية، مؤملة أن تجعل منه مزارعا. لكنه لم يكن ملائما لمثل هذا العمل، فحين يرسل وراء الأبقار كان يأخذ كتابا معه، ثم يعثر عليه بعد ساعات مستغرقا فى القراءة، ناسيا كل شيء عن مهمته. ولكنه كان طالبا متميزا، فأقنع مدرسوه والدته أن ترسله للجامعة.

وفى كلية ترنتى بكامبردج درس المنهج المعتاد، ورغم أن تحصيله كان جيدا، إلا أنه لم تبد عليه علامات تميز غير عادي. إلا أن نبوغه لفت نظر أحد أساتذته، إسحاق بارو.

ونال درجته العلمية عام ١٦٦٥، نفس عام انتشار وباء الطاعون فى إنجلترا. واضطر لذلك إلى العودة إلى قريته ليقضى فيها العامين التاليين. لم يكن يبدو عليه أنه يفعل شيئا هاما، فهو يقضى معظم وقته فى مكتبه، أو متجولا فى الحديقة سابحا فى أفكاره. ولكن إنجازه فى هذين العامين يعتبر من أكثر ما تحقق للعلم من إنجاز. كان فى أوج نبوغه، وقد استغله أفضل استغلال. فبعد ملاحظته وقوع التفاحة، قام بأهم اكتشاف فى تاريخ العلم، حيث صاغ قانون الجاذبية: كل جسم فى الكون يجذب الآخر بقوة تتناسب عكسيا مع مربع المسافة بينهما. كانت لغة غريبة وعصية على الفهم بالنسبة للغالبية، ولكنها أسبغت على الكون صورة من نظام جديد.



نيوتن

كان هذا الاكتشاف وحده حريا بأن يحفر اسمه فى صف مشاهير العلماء إلى الأبد، ولكنه لم يقف عند ذلك. فخلال ذات العامين اكتشف قوانين الحركة، والكثير من خصائص الضوء، وقوانين العدسات، ووضع علم التفاضل والتكامل. ياله من إنجاز لمن لم يتجاوز السادسة والعشرين بعد.

وبينما كان قانون الجاذبية هاما فى حد ذاته، سرعان ما مكن العلماء من القيام بتنبؤات حول النظام الشمسي، إلا أن أهم ما فيه كان عموميته. لم يكن تطبيقه مقصورا على الأرض، بل يشمل الكون بأسره.

هل قام نيوتن على الفور بنشر اكتشافاته؟ كلا، فالعجيب أنه اكتفى بإنجازها، وصمت عنها بعد ذلك قرابة عقد كامل من الزمن.

وحين انقشع بلاء الطاعون، عاد إلى ترنتي، وبعد عامين حل محل أستاذه بارو فى رئاسة كرسى الرياضيات. وعلى مدى الأعوام القليلة التالية كان مهتما بصفة أساسية بالضوئيات. أخذ يجرى التجارب على العدسات، ويرى ما يجرى فيها من انعكاس

وانكسار لأشعة الضوء. وعند استخدام المنشور الزجاجى رأى كيف يتحلل الضوء إلى ألوان الطيف، مما أقنعه أن الضوء الأبيض مكون من هذه الألوان. كما اخترع التلكسوب العاكس، وحين أظهره أمام الجمعية الملكية اختير على الفور عضوا بها. وقد شجعه بعض الأعضاء على أن يقدم بحثا عن اكتشافاته فى الضوء، وحين فعل أصيب بأكبر صدمة أثرت فى مسيرته العلمية. لقد انبرى لتفنيد آرائه بعض الأعضاء، وقام بدوره بالرد على انتقاداتهم بصبر فى أول الأمر، ولكن حين طال الجدل انسحب كسير الفؤاد، مقسما ألا ينشر اكتشافاته بعد ذلك.

وقام فى عزلته التى ضربها على نفسه بعد ذلك بصياغه قوانيه عن الديناميكا والجاذبية. كان محتملا أن تظل هذه الاكتشافات حبيسة أدراج مكتبه لو لم يظهر إدموند هالي Edmond Halley على مسرح الأحداث. ففى يناير من عام ١٧٨٤ كان هالي، فى السابعة والعشرين آنذاك، يتحدث مع كرستوفر رين، عالم يعمل لنصف الوقت فى كاتدرائية سانت بول، وروبرت هوك الذى سبق أن قام بعدة اكتشافات فى الفيزياء والفلك. كان الرجلان أسن منه كثيرا، وكان محور الحديث هو حركة الكواكب، وسبب دورانها حول الشمس بالصورة التى تتم بها. كان هوك وهالى مقتنعين بقانون التربيع العكسي، ولكن السؤال كان حول طبيعة المسار طبقا لذلك القانون، وعما إذا كان القانون يصلح لاستخلاص قوانين كبلر.

وزعم هوك بتعال أنه قد وجد الإجابة عن هذين السؤالين، ولكنه لم يكن مستعدا بعد لنشر الموضوع، وتشكك رين فى هذا الزعم، وعرض جائزة مقدارها أربعون شلنا لمن يأتيه بالإجابة الشافية فى غضون شهرين.

وعالج هالى المسألة دون جدوى، وحين لم يقدم هوك برهانه المزعوم، قرر هالى اللجوء لنيوتن. كان قد سبق له زيارته واكتسب صداقته، وقابله نيوتن بأدب، ولكنه أضحى متشككا فى الجميع. وتحادث الرجلان لفترة من الوقت، ثم طرق هالى السؤال الذى جاء من أجله؛ ما نوع المسار الذى يتحقق طبقا لقانون التربيع العكسي؟ ورد نيوتن على الفور: "قطع ناقص".

دهش هالى للفورية والثقة فى رد نيوتن، وسأله عن البرهان، فعرض نيوتن أن يعطيه ما قام به من حسابات لحل المسألة، ولكنها لم تكن تحت يديه وقتها، فوعد بإرسالها له.

وبعد خمسة شهور وصل هالى ما وعد به نيوتن، كانت الإجابة متضمنة فى تسع صفحات، اشتم منها هالى أن نيوتن لديه المزيد عن الموضوع، مكدس فى خزائن مكتبته، فهرع راجعا إليه سائلا عما إذا كان محقا فى هذا الظن، فأجابه نيوتن بالإيجاب، إن لديه الكثير من الإنجازات، ولكنه غير مستعد لنشر أى منها، فلا تزال مرارة تجربته السابقة عالقة بفمه.

وظل هالى ملحا على نيوتن إلى أن رضخ للأمر، وقبل عرض الأبحاث على الجمعية الملكية لنشرها. ورغم إقرار الجمعية بأهميتها، فإنها اعتذرت لضيق ذات اليد، فكتابها الأخير (عن تاريخ الأسماك) أدى إلى إفلاسها. أما بالنسبة لنيوتن فهو على ثرائه عزف عن تمويل المشروع، فتصدى هالى له رغم رقة حاله، وفى خلال عامين كان الكتاب قد اتضحت ملامحه.

لم يكن نيوتن قد أنجز الكثير فى موضوع علم الديناميكا خلال هذين العامين، ولكنه ما أن رأى ما قام به قد أصبح حقيقة واقعة حتى عادت إليه حمية العمل، فانكب عليه بكل حماس. لقد أراد أن يحوز كتابه الكمال، وقد فعل.

كان معنونا "المبادئ الأساسية لفلسفة الطبيعة"، أو باختصار "البرنسيبيا (المبادئ")، كان مقسما ثلاثة أجزاء، وكان قانون الجاذبية فى قسمه الثالث. وحين سمع هوك بالأمر استشاط غضبا، وطالب أن يذكر اسمه كمكتشف لقانون التربيع العكسي. وكان نيوتن يحمل لهوك الشيء الكثير، فقد كان على رأس معارضيه فى تجربته المريرة السابقة، علاوة على تعمده فى مناسبة أخرى إلى التشهير به لخطأ تافه فى حساباته، ولم يغفر نيوتن له ذلك أبدا. وأعلن نيوتن من جانبه أنه يفضل عدم نشر القسم الثالث على أن يذكر فيه هوك، وتدخل هالى فى الأمر إلى أن نجح فى تسويته، وجاء الكتاب خاليا من أية إشارة لهوك.

لقد عالج الكثيرون فى الواقع قانون التربيع العكسي، ومنهم هوك، ولكنه لم يفعل به شيئا يذكر. أما نيوتن فقد ضمنه قانونه العام للجاذبية، وطبقه على حركة القمر، والأهم من ذلك، فهو قد توصل له قبل هوك بسنوات عديدة.

ويعتبر كتاب البرنسيبيا اليوم من أهم الكتب العلمية التى تم نشرها فى تاريخ العلم، وقد راج على الرغم من صعوبة لغته، وارتفع به شأن نيوتن على الفور إلى

مصاف أعظم علماء التاريخ. لقد كان بلا مراء نقطة تحول في تاريخ العلم، مميزا نشأة الفيزياء النظرية. لقد أدخل نيوتن الرياضيات في الفلك والفيزياء، ومن خلال ذلك قدم فهما جديدا للطبيعة.

في مكان قريب من مقدمة الكتاب كانت قوانين نيوتن الثلاثة للحركة، كان لجاليليو بعضا من الأفكار حولها، ولكن نيوتن هو من صاغها في ثلاثة قوانين بسيطة. فقانونه الأول ينص على أن أي جسم يسير بسرعة ثابتة في خط مستقيم لن يتغير من سرعته أو اتجاهه إلا عند تسليط قوة خارجية عليه، وينص قانوه الثاني على أن الجسم يكتسب عجلة حين يقع تحت تأثير قوة، وينص الثالث على أن لكل فعل رد فعل مساو له في المقدار ومضاد له في الجاذبية. ونحن نعايش القانون الثالث في حياتنا اليومية، فحين نمسك بخرطوم للمياه، نشعر بقوة تدفع يدنا للخلف مع اندفاع الماء إلى الأمام.

وسرعان ما أصبحت البرنسيبيا مرجعا لعلم الديناميكا الوليد.

قوة التنبؤ

أصبح بإمكان العلماء حساب مسارات الأجرام السماوية باستخدام هذه القوانين. ولم يكن ذلك بالأمر اليسير، فقد تطلب تمكنا من التعامل مع دقائق النظرية، بل إن نيوتن ذاته كان يواجه صعوبة في ذلك، ولم يكن سعيدا تماما بالنتائج التي حصل عليها عند تطبيقه النظرية على القمر لقد كان عليه أن يجري بعض التحايل حتى تتواءم النتائج مع الشواهد (كان هذا بقدر كبير بسبب عدم دقة المسافة المقدرة آنذاك بين الأرض والقمر). لقد كان تطبيق النظرية على الأرض والقمر معا أمر يسير، ولكن حين يحتوي النظام على ثلاثة أجرام كانت الصعوبة بالغة. ومسألة الأرض والقمر هي في الواقع مسألة ثلاثة أجرام، حيث إن للشمس تأثيرا على كلا الجرمين الآخرين. وقد تحايل نيوتن على هذه الصعوبة بتطبيق أسلوب يسمح له بأن يعالج المسألة في البداية كجرمين، الأرض والقمر، ثم يضيف تأثير الشمس في خطوة تالية. كان هذا الأسلوب متاحا فقط عندما يكون مثل هذا التأثير طفيفا كحالتنا هذه.

وكان أول من طبق نظرية نيوتن بعد ذلك هو هالي، فقد تنبأ بواسطتها عن موعد حلول مذنب ساطع الإضاءة شوهد في وقت ما، فحسب مداره وتوقع اقترابه من الأرض عام ١٧٥٨، بل وبين موضعه من السماء. لم يحز أمر مذنب هالي، كما يعرف

اليوم، فى البداية الكثير من الاهتمام، ولكن بحلول عام ١٧٥٠ بدأت الإثارة. كان هالى قد توفى عام ١٧٤٢، ولكن الهوس أصاب العديد أن يكون منهم أول من يشاهد مذنبه. لقد كان هذا محكا شديدا لصدق نظرية نيوتن.

وفى ليلة عيد الفصح لذات العام شاهد فلاح ألماني، جوهان بالكتش فى نفس الموضع الذى توقعه هالي، المذنب المقصود، وطفر العالم بالإثارة، لقد ثبتت الساعة الكونية التى تحرك الكون، وكان لنيوتن الفضل فى فهم آليتها.

وجاء التأكيد الثانى بعد ٤٢ عاما. ففى عيد فصح عام ١٨٠٠ شاهد الفلكى الصقلى جيوسبى بيازى Giuseppe Piazzi وهو بصدد رسم خريطة للسماء وجود جرم لم يشاهد من قبل. وظن أنه مذنب، ولكن لم يكن يبدو عليه التشويش المعروف عن أغلبها، بل كان له قرص لا تخطئه العين، فأخطر به جوهان بود Johann Bode فى مرصد برلين، واقترح الأخير أن يكون كوكبا. قبل ذلك بعد سنوات كان جوهان تيتيوس Johann Titius قد بين وجود علاقة رقمية عجيبة بين مدارات الكواكب وبعدها مقدرة بالأبعاد الفلكية ، على النحو التالي: لكل من الأرقام ٣، ٦، ١٢، ٢٤، .. أضف ٤ واقسم على ١٠ , وكانت المشكلة أن هذه المتسلسلة قد تنبأت بوجود كوكب بين المريخ والمشترى لم يشاهده أحد بعد، وكان بود متأكدا من أنه الكوكب المقصود.

كانت أول خطوة هى حساب مداره، ولكن بيازى لم يحصل إلا على عدة رصدات قبل أن يختفي، وهو مالا يفى بغرض القيام بالحساب المطلوب طبقا للأسلوب المطبق آنذاك. وحين وصلت الأنباء إلى الرياضى العبقرى كارل جاوس طار من الفرح، إذ كان قد ابتكر أسلوبا آخر تفى لتطبيقه مثل هذه الرصدات القليلة، وكانت فرصة لاختبار أسلوبه المبتكر. تنبأ جاوس بموعد ظهوره التالي، وصدق الكوكب ظنه، ولكن خاب أمل الفلكيين فى أن يكون الكوكب الذى يبحثون عنه، بل كان أصغر بكثير، كان أحد الكويكبات.

وأتيحت فرصة أخرى لاختبار قوانين نيوتن ولكن بطريقة أخرى بعد عدة سنوات، ففى مارس من عام ١٧٨١ شاهد ويليام هرشل William Herschel أيضا جرما لم يشاهد من قبل، فظن أنه مذنب، ولكن كان له قرص حاد، ويتحرك ببطء أكثر، فطير الخبر إلى الجمعية الملكية. وبمزيد من الدراسة تبين أنه كوكب، قام سيمون لابلاس

وأخرون بحساب مداره فى غضون بضعة سنوات. لكن سرعان ما أصبح من الواضح وجود خطأ ما. ففى خلال عقد من الزمان حاد الكوكب عن مساره المتوقع، وظل يحيد أكثر وأكثر بعد عدة عقود. وأجريت محاولات لتصحيح الحسابات بالنسبة للمشترى وزحل، ولكن لم تفد شيئا. ودب الشك فى قوانين نيوتن، هل تراها تصلح للكواكب البعيدة؟ واقترح لابلاس وآخرون وجود كوكب آخر بعد أورانوس يسبب هذا الحيود.

وجاء التفسير بعد ذلك بثلاثين عاما، ففى عام ١٨٤١ اهتم طالب ذو اثنين وعشرين عاما هو جون آدمز John Adams بجامعة كمبردج بالمسألة، وسرعان ما اقتنع بوجود الكوكب المقترح. وفى العام التالى كان تخرجه، وحصل على وظيفة فى كلية سانت جونز، وأصبح يقضى أوقات فراغه فى التفكير فى هذه المسألة. لم تكن مهمة يسيرة، إذ لم يسبق لأحد معالجة أمر كهذا من قبل. فى مراحل مبكرة من حل المسألة كان يفترض المسارات الدائرية، ولكن حينما كان يضطر فى المراحل المتأخرة إلى الانتقال للمسار الإهليلجى كانت الأمور تتعقد بقدر كبير.

وفى سبتمبر عام ١٨٤٥ شعر بأنه اقترب كثيرا من تحديد موضع الكوكب بالدرجة التى تتيح البدء فى البحث عنه. وأخذ أبحاثه إلى كل من جيمس تشاليز James Challis مدير مرصد كمبردج وجورج آرى George Airy الفلكى الملكي، كان الرجلان يشجعانه من قبل، رغم عدم اقتناعهما بالأسلوب الرياضى وجدارته فى عملية التنبؤ. ولذا فحين أظهر لهما آدمز حساباته نظرا إليها نظر شك، ووجدا أن الأمر لا يستحق تغيير خطة عمل المراصد للبحث المطلوب، وعبثا حاول آدمز إقناع أى منهما، فانسحب كسير القلب، ومضى فى تنقيح حساباته.

لم يكن يعلم آدمز بوجود رياضى فرنسى مشغول بذات المسألة فى نفس الوقت، وهو أوربيان لى فيرييه Urbain Le Verrier . كان قد قدر موضع الكوكب الذى يسبب هذا الاضطراب، وأخطر جمعية العلوم بباريس بما توصل إليه، ولم يكن حظه أفضل من حظ زميله رغم إصراره وتقديم ورقة بحث ثانية.

وصل البحث إلى آيرى فى إنجلترا، ودهش لمدى التطابق بين النتيجتين، فقرر أن يتخذ الخطوة المطلوبة، وأصدر أمره لتشاليز أن يبدأ البحث، ولكن هذا الأخير بدلا من أن يبحث فى الموضع المقصود، أخذ فى إجراء أرصاد روتينية فى منطقة شاسعة حوله.

وضاق فيرييه بالأمر، وكان قد سبق أن تلقى رسالة من خريج شاب من ألمانيا، هو جوهان جاليه، يعمل فى مرصد برلين، تحمل نسخة من بحث له لم يعره اهتماما، ولكنه أصبح الآن ينظر إليه كباب للفرج، فرد على رسالته مقرظا لها، وسائلا إن كان يثير اهتمامه البحث عن كوكب جديد، وأرسل إليه إحداثيات موضعه. وشعر جاليه بالزهو لهذا التقدير، وطلب من مدير المرصد السماح له بالبحث، وتصادف أن كانت عطلة لأعمال المرصد فلم يبخل عليه بالموافقة. فى غضون ساعة كان جاليه مع مساعد له قد رمقا جسما ليس موجودا على خرائط السماء لهذه المنطقة منها، وكان من الصعب على مثلهما فى موقف كهذا كبح جماح ابتهاجهما، ولكن تحتم المزيد من البراهين، ترى هل هو كوكب حقا. فى الليلة التالية قارنا موضعه، فوجداه قد تحرك أمام خلفية نجوم السماء، إنه كوكب بالفعل.

كان الكوكب فى حدود درجة واحدة من حسابات كل من آدمز ولا فرييه، انتصار آخر لنظرية نيوتن. وطارت الأنباء فى كافة أنحاء الدنيا، وكانت صدمة قاسية على أيري، لقد تباطأ فى الأمر إلى أن حاز مرصد برلين قصب السبق، وظل إلى سنوات عديدة يحاول أن يتعايش مع الشعور بالحرج.

والعجيب فى الأمر أن تشاليز لمح الكوكب مرتين بالفعل، ولكنه لم يقدر أنه أحد الكواكب، وقد سبق رؤيته عشرات المرات من قبل، بل إن جاليليو قد رآه خلال دراسته لأقمار كوكب المشترى.

وحين أعلن آرى أن آدمز قد سبق لا فرييه فى التنبؤ بالكوكب قامت الدنيا ولم تقعد فى القارة الأوربية، على أن الأمر سوى بعد ذلك، ونسب الفضل لهما معا.

بزوغ التحديدية

كما رأينا من قبل، كانت إحدى إنجازات نيوتن العظيمة هى وضع علم التفاضل والتكامل، حققها بعد قليل من عودته إلى كامبردج. ورغم أنه عرض على بارو هذا الأسلوب الرياضى المبتكر، فإنه كعادته لم يقم بنشره. والعجيب فى الأمر أنه لم يطبقه فى كتاب البرنسيبيا، فكل شيء فى الكتاب معالج هندسيا، وظل هذا هو الأسلوب المتبع من قبل الرياضيين لسنوات تالية. ولكن بخطوات تدريجية واثقة أخذت المعادلات الرياضية تحل محل الأسلوب الهندسى المعقد، وسرعان ما أصبح لعلم الديناميكا أساس تحليلى راسخ. أصبح بإمكان العلماء أن يضعوا معادلات حول الظواهر

الفيزيائية، وما أن تحل معادلة منها حتى يمكن تحديد الماضى والمستقبل للظاهرة محل البحث.

ويعزى أغلب المساهمات فى هذا التحول للرياضى ليونارد أويلر Leonhard Euler، المولود فى بازل عام ١٧٠٧, وفى عام ١٧٢٧ قدمت له دعوة للعمل بأكاديمية بطرسبرج التى كانت تؤسس فى موسكو آنذاك. وفى بطرسبرج تجاوز اهتمامه بالرياضيات، وأخذ يهتم برصد الشمس إلى أن فقد إحدى عينيه خلال ذلك، ولكن ما أنجزه كان رائعا بحق. وتحت تأثير الاضطرابات السياسية عاد إلى برلين ليعمل فى أكاديميتها. وفى عام ١٧٦٦ تملكت الإمبراطورة كاثرين زمام الأمور، وصممت على استعادة مجد أكاديمية بطرسبرج بعد تدهوره، فأرسلت إلى أويلر، الذى كان قد وضع فى مصاف أعظم رياضيى العصر، للعودة للعمل بها. وفى طريق العودة فقد إبصار العين الثانية، ولكن لم يكن لفقد البصر الكامل أثر على إنجازاته. كان يتمتع بذاكرة أسطورية، وكان على مقدرة من التعامل مع الأرقام من خلالها، كما لو كانت سبورة بالنسبة له.

وخلال حياته نشر أويلر حوالى ٨٠٠ بحث وكتاب، مما جعل منه أغزر رياضيى أوربا إنتاجا فى عصره، وبعد وفاته استغرق الأمر سنوات لتصنيف مالم يعن بنشره خلال حياته.

قدم أويلر مساهمات فى كافة فروع الرياضيات، ولكن كان من أهمها إدخاله أسلوب التفاضل والتكامل كأساس راسخ لصياغة المعادلات الرياضية. وبنفس القدر من الأهمية تطبيق هذه المعادلات على حركة النظم الطبيعية. ونشر عدة مراجع، البعض منها ليست مسبوقة بغيرها. ففى عام ١٧٣٧ ألف مرجعا متعلقا بتطبيق معادلات نيوتن على حركة جسم مجرد إلى نقطة لا أبعاد لها، ليس فيه أية إشارة لشكل هندسي، وفى ١٧٦٥ عمم الطريقة فى كتاب مرجعى ثان على الأجسام بأبعادها الواقعية. وقام فى نفس الوقت بنشر بعض المراجع عن علم التفاضل والتكامل، بادئا فى ١٧٥٥ بالتفاضل. وفى الفترة من ١٧٦٨ إلى ١٧٧٤ أصدر ثلاثة أجزاء عن التكامل. أما نظريته عن المعادلات التفاضلية فقد وضعها فى مؤلفات لاحقة. كما كان لأويلر اهتمام بالغ بالفلك، إذ أصدر عام ١٧٧٤ مرجعا عن النظام الشمسي.

وحين كان رئيسا لأكاديمية برلين لفت نظره عمل رياضى شاب، هو جوزيف لاجرانج Joseph Lagrange إلى درجة أنه أوصى بأن يخلفه حين ارتحل عن الأكاديمية.

كـان والد لاجـرانج يريد له أن يسلك طريق القانون، ولكن الابن تصـادف أن قـرأ خلال المرحلة الدراسية بحث إدموند هالى عن علم التفاضل والتكامل، فبـهر به، وطفق يقرأ كل ما يقع تحت يديه عنه، وقرر أن تكون الرياضيات مادة دراسته. وتابع طريق أويلر فى تطبيق المعادلات التفاضلية على علم الميكانيكا، ومن أهم إنجازاته فى ذلك وضع الإحداثيات المعممة. قبل هذا العمل كانت الإحداثيات تحدد بحسب طبيعة المسألة (إحداثيات قطبية أو اسطوانية ... الخ)، ولكنه وضع نظام إحداثيات يصلح لكافة النظم، وبواسطته استطاع وضع معادلات شاملة للميكانيكا، ونشر أبحاثه فى كتاب بعنوان "الميكانيكا التحليلية"، وعلى عكس كافة الكتب السابقة فى الموضوع، لم يكن يحتوى على شكل هندسى واحد.

وكما رأينا سابقا، كان نيوتن قد تمكن من حل نظام ذى جسمين بتفصيل تام، إلا أنه وجد صعوبة فى تطبيق معادلاته على نظام ذى ثلاثة أجسام. ووضع لاجرانج أسلوبا لمعالجة هذه المسألة.

وانتقل لاجرانج إلى باريس عام ١٧٨٩، ولكن مساهماته فى الرياضيات لم تكن بالغزارة السابقة إلى أن توفى عام ١٨١٣.

وانتقل المشعل إلى بيير لابلاس Pierre Laplace، المولود عام ١٧٤٩. رحل لابلاس إلى باريس وهو فى الثامنة عشرة حاملا خطاب توصية إلى الرياضى العظيم لا روند دى لامبرت، لم يأبه به فى بادئ الأمر. عندئذ قدم لابلاس له بحثا رياضيا أثار شغفه فى الحال، فمنحه وظيفة فى الجامعة.

وبذل لابلاس جهدا متواصلا فى تطوير نظرية نيوتن وبسط مداها حتى لقب بنيوتن الفرنسي. فقد طور من نظرية الجاذبية ونشر أبحاثه فى كتاب ذائع الصيت بعنوان "الميكانيكا السماوية"، فيما بين عام ١٧٩٩ و١٨٢٥. ويتمثل إنجازه فى وضع معادلة أضحت أساسا لنظرية الجاذبية، طورها فيما بعد سيمون بواسون.

ببطء راسخ الأقدام بدأت كافة فروع الفيزياء تنضوى تحت لواء الرياضيات، فوضعت معادلات عن الحرارة والضوء والكهربية الاستاتيكية والهيدروميكانيكا، كل هذه الموضوعات سهل استيعابها عن طريق المعادلات التفاضلية. فحين تعرف الظروف الابتدائية، يمكن حساب مستقبل أى نظام بدقة متناهية.

إن المعادلات التفاضلية فى الواقع ليست سهلة الحل، ولكن ذلك لم يفت فى عضد الرياضيين، ففى أحوال عديدة أمكن حساب سرعة جسم وموضعه إلى ما شاء الله، بهذا بدأ عصر التحديدية، والذى يعتبر لابلاس أحد أعمدته الراسخة. لقد وصل به الأمر إلى أن يقول متباهيا بأنه لو عرفت ظروف كل جسيم فى الكون، لتنبأ بمسقبله إلى يوم الدين. إن وجه الصعوبة فى هذا القول عملية صرفة، أما من الناحية النظرية فالمفروض أنه صحيح.

ولكن الرياضيين وجدوا أن المسألة ليست مقصورة على صعوبة حل بعض المعادلات، بل إن بعضا منها غير قابل للحل على الإطلاق. فى البداية كان تجاهل مثل هذه "الحالات الخاصة"، ولكن بمرور الوقت بدأ الاهتمام بها يتزايد، وحين بحثت بشيء من الاستفاضة، قدر لوجه العلم أن يتغير تغيرا جذريا.

الفصل الثالث

إرهاصات الهيولية

بحلول القرن التاسع عشر كانت الرؤية التحديدية للظواهر الطبيعية قد ثبتت أقدامها، فحين تعرف الظروف الابتدائية من موضع وسرعة لجسم ما، والقوة المؤثرة فيه، يمكنك أن تتوقع موضعه وسرعته فى أى زمن مستقبلي، عن طريق تطبيق المعادلات التفاضلية. فحين تتدحرج كرة من فوق تل، يمكن معرفة موضعها وسرعتها بعد أى وقت من هبوطها، طالما عرف ارتفاع التل. ولو كانت الأرض والشمس هما الجرمان الوحيدان للنظام الشمسى، لأمكن معرفة مسار الأرض بكل دقة. ولكن خذ نظاما ذا ثلاثة أجرام وحاول معه، ترى المسألة قد أصبحت مفزعة فى صعوبتها، متاهة من المعادلات التى تذهب بلب أشد رجال الرياضيات مراسا. أما لأكثر من ثلاثة أجرام فالأمر ببساطة .... لا يقبل مجرد التفكير فيه.

ولكن أغلب النظم تبدو محتوية على أكثر من جسمين، فنظامنا الشمسى يحتوى على عشرة من الأجرام الضخمة، وعشرات من الأجرام الصغيرة. ولكن الحقيقة أن النظام الذى كان يجذب الانتباه آنذاك كان هو الغازات. لعلك لا تتصور الغاز كنظام، ولكنه كذلك بالفعل، وفى مطلع القرن التاسع عشر لم يكن معروفا عنه إلا النذر اليسير. إن القوانين الأساسية للغازات كانت قد اكتشفت، وكان الفيزيائيون مقتنعين بإمكان استنباطها من تصرفات مكونات الغازات، ألا وهى الجزيئات.

ولكن، كيف يمكنك التعامل مع الغازات؟ إن حجما متناهيا فى الصغر منها يحتوى على بلايين الجزيئات. فاحتمال تطبيق قوانين نيوتن على كل جزيء على حدة ثم تجميع النتائج أمر لا يتصور. والأهم من ذلك، لقد كانت مسألة تكون الغازات من جزيئات فى حد ذاتها أمرا خلافيا فى ذلك الوقت.

ولكن مهما كان الأمر فلا بد من مخرج، فالغازات ذات خصائص تجعلها تتصرف بطريقة قابلة للتنبؤ، ولا بد من وجود نظرية كامنة وراء هذه الخواص. وإذا كان المنهج التحديدى المباشر غير متصور، فإن طريقة المتوسطات والاحتمالات يمكن تطبيقها، وكما سترى كانت بالفعل مفتاح القضية.

بزوغ المنهج الإحصائي

نظرية الاحتمالات هى أساس النظرية الجزيئية للغازات، ولكنها كما قد تتوقع قد وضعت لسبب آخر تماما. فالمقامرون فى كل زمان ومكان يودون لو أن الأمور تسير فى صالحهم على الدوام، ويتساءلون عن كيفية تحقيق ذلك. وقد أرسل أحد مشاهير المقامرين فى القرن السابع عشر إلى الفيزيائى الفرنسى بليز باسكال Blaise Pascal شارحا له سوء حظه الدائم فى عملية تخمين رمى النرد. وأثارت المسألة فضول باسكال، وقرر مع زميله بيير فارما Peirre Fermat أن يبحثا الأمر بشيء من العمق، فتوصلا معا إلى وضع أساسيات نظرية الاحتمالات، وعلى وجه الخصوص، فهما قد وضعا تعريفا للاحتمال. فلو أن حادثة يحتمل أن تتم بعدد من الاحتمالات يساوى "س"، وألا تتم بعدد من الاحتمالات يساوى "ص"، فإن احتمال الحدوث هو "س" مقسوما على "س + ص"، وعدم الحدوث هو "ص" مقسوما على "س + ص".

ولم يكن هذا إلا مجرد قمة جبل الجليد، ولكن غاصت النظرية فى غياهب النسيان لعدة عقود تالية. لقد استفاد المقامرون بالطبع من هذه الفكرة، ولكنها لم تجذب انتباه أحد غيرهم. ليس قبل مطلع القرن التالي، حينما تناول لابلاس أفكار باسكال وفرمات المتناثرة ليصوغ منها فرعا راسخ البنيان من فروع علوم الرياضيات، نشره فى كتابه "نظرية تحليلية للاحتمالات".

ومع اكتشاف هذه الأفكار الأساسية، بدأ القوم يطبقونها على النظم المعقدة، فظهر بالتالى علم الإحصاء، وأصبح بإمكان العلماء أن يربطوا بين الحالات الجزيئية غير المرئية للغازات وبين خواصها المرئية القابلة للقياس.

بولتزمان، ماكسويل، والنظرية الجزيئية للغازات

وضعت أول نظرية عن الغازات على يد دانيال برنولى Daneil Bernoulli. وقد ولد دانيال من أسرة تنتشر الرياضيات بين أفرادها بصورة تدعو للدهشة، فعمه وأخوان له

وابن عم له وعدد من أبناء إخوته كانوا من المشتغلين بالرياضيات. ويعرف برنولى اليوم بمساهمتة فى ديناميكا الموائع، وقانونه الشهير: حينما تزداد سرعة السائل يقل ضغطه، وهو أحد القوانين الأساسية فى الفيزياء.

افترض برنولى أن الغاز مكون من جسيمات مرنة، منتشرة فى حركات سريعة للغاية، تتصادم فيما بينها ومع جدران الإناء المحتوى لها. وعلل ضغط الغاز بأنه نتيجة تصادم هذه الجسيمات بجدران الإناء. إلى ذلك الوقت كان العلماء يظنون أن الضغط نتيجة قوة تنافر بين جسيمات الغاز.

كانت نظرية برنولى خطوة فى الاتجاه الصحيح، لقد أدخل فكرة الاحتمالات فى دراسة الغازات، ولكن كانت تنقصه أساليب المعالجة الرياضية ليضع نظرية متكاملة، ومن ثم فقد انقضى قرن كامل قبل أن يتم تناول المسألة بصورة جدية. وحين تم ذلك، انهمرت الاكتشافات كالسيل، ويرجع الفضل فى ذلك إلى اثنين من العلماء بصفة خاصة، لودفيج بولتزمان Ludwig Boltzmann من النمسا، وجيمس كلارك ماكسويل James Clerk Maxwell من اسكتلندا.

ولد بولتزمان فى فينا عام ١٨٤٤، وحصل على درجة الدكتوراه من جامعتها عام ١٨٦٦، وقد يكون من المستغرب اليوم مدى وطيس المعركة حول مسألة تكون العناصر من ذرات وقتها. كان بولتزمان منتصرا بجنون لهذه الفكرة، وألقى بكل ما يملك من أسلحة فى معركتها. ومن عجب أن يكون مناهضا له علماء لهم وضعهم، مثل إيرنست ماخ وفيلهيم أوستفالد. وحين أيقن بولتزمان من خسارة المعركة أمام هؤلاء العلماء الفطاحل، وامتلأت نفسه حسرة واكتئابا، اتخذ الخطوة الأخيرة، فأجهز على نفسه منتحرا عام ١٩٠٥, ومن سخرية القدر أن يعترف بصفة قاطعة بوجود الذرات بعد ذلك بوقت قليل.

وضع بولتزمان أساسا رياضيا صلبا لنظرية برنولى عن الغازات، ولكنه فعل ما هو أكثر من ذلك. كان علم الديناميكا الحرارية الذى يربط بين الحرارة والطاقة الميكانيكية علما وليدا، وقد أدخل فيه بولتزمان الكثير من أفكار النظرية الجزيئية. فقبل ذلك بأعوام، وبالتحديد عام ١٨٥٠ أدخل العالم الألمانى رودولف كلاسيوس Rudolf Clau-sius مفهوما جديدا هو "الانتروبيا" Entropy، كنسبة بين الحرارة المحتواة فى نظام

ودرجة حرارته، ووضع قاعدة قاطعة بأن هذه الخاصية تتزايد باطراد فى أى نظام منغلق على نفسه.

وبين بولتزمان أن خاصية الانتروبيا هى أيضا مقياس لدرجة العشوائية فى أى نظام، ووضع معادلة لها بدلالة الاحتمالات المختلفة لحالات النظام. هذه المعادلة التى تعتبر أعظم إنجازاته محفورة اليوم على شاهد قبره.

وبينما كان بولتزمان منشغلا بالنظرية الجزيئية، كان ماكسويل فى إنجلترا مشغولا بها أيضا. ولد ماكسويل فى ضيعة قرب أدنبرة، وعرف منذ مطلع شبابه بغرامه بالألغاز الرياضية، وقد عشق مثل نيوتن صناعة الساعات والعجلات المائية والأجهزة الميكانيكية. لم يكن مستغربا منه أن ينشغل وهو على مائدة الطعام بتجربة عن الصوت أو الضوء حتى ينسى طعامه.

ماتت والدته وهو فى الثامنة، وأرسل فى العام التالى إلى أكاديمية إدنبرة ليبدأ مرحلة التعليم. وفى الخامسة عشرة حاز وساما لنجاحه فى حل إحدى المعضلات الرياضية.

وانتقل إلى الجامعة فى إدنبرة، وخلال مرحلة قبل التخرج أرسل بحثين إلى الجمعية الملكية، إنجاز ليس بالهين لمن هو فى عمره. وفى عام ١٨٥٠ استعد لاجتياز امتحان تنافسى هام يسمى "تريبوس"، يعطى من يفوز بالمركز الأول فيه وضعا متميزا. وقبل الامتحان أصيب بالمرض بما وجب أن يقعده عن الامتحان، ولكنه صمم على حضوره، وقطع الطريق ملتفا فى بطانية بين عطس وسعال، وفاز بالمركز الثاني، أما الفائز بالمركز الأول فلم يحقق أى ذكر فى الحياة العلمية.

وبعد التخرج منح منصبا فى جامعة أبردين، وبعد عدة أعوام أعلن عن جائزة قيمة لمن يعطى تفسيرا لحلقات كوكب زحل، أهى غازية أم سائلة أم أجسام صلبة؟ وبعد عمل شاق فاز بالجائزة بعد أن بين أنها مكونة من آلاف من الاجرام الصغيرة، كل يسير فى مدار خاص به. وخلال هذا العمل تمكن من أساسيات علم الديناميكا، وفى عام ١٨٦٠ قرر أن يستخدم ما تعلمه فى دراسة لنظرية برنولى عن الغازات.

كانت أول المشاكل التى تواجهه متمثلة فى إيجاد صيغة للتوزيع الإحصائى لسرعات الجزيئات المكونة للغاز، وقد تتبع خطى برنولى فى اعتبار الغاز مكونا من

جسيمات تتحرك بسرعات مختلفة فى شتى الاتجاهات. وحين وصل لتلك الصيغة وجد أن السرعات تختلف فيما بينها اختلافا بينا، حين ترسم على شكل بيانى فإنه يأخذ شكل الجرس. هذا الشكل نسميه الآن منحنى التوزيع الطبيعي، وكما سنرى تدور حوله أغلب الأفكار الإحصائية، فقد بين جاوس مثلا أن أخطاء الرصد فى الفلك تأخذ عندما توقع بيانيا مثل هذا الشكل.

وفى نهاية حياته وقع ماكسويل مثل بولتزمان فريسة الإحباط بسبب موضوع الاعتراف بوجود الذرة، ولكن الأمر لم يصل به إلى ما وصل ببولتزمان. وكانت نهايته السريعة لسبب آخر، فقد أصيب بالسرطان الذى لم يمهله كثيرا.

وعلى الرغم من قصر حياته، فقد ترك ثروة علمية طائلة. فبالإضافة لعمله فى الغازات مستقلا عن بولتزمان، وضع نظرية راسخة عن الموجات الكهرومغناطيسية، مؤسسا إياها على أربع معادلات بسيطة.

وبفضل مساهمات الكثير من العلماء أصبح علم الإحصاء من الأساليب الهامة فى الرياضيات. ومن المثير أن الكثير من هذه المساهمات لم تأت من قبل الفيزيائيين، بل أحيانا من قبل علماء البيولوجيا وأحيانا أخرى من علماء العلوم الاجتماعية. وفى هذا المجال الأخير لمع اسم شخصيتين، لامبرت كاتيليه Adolph Quetelet البلجيكى وفرانسيس جالتون Francis Galton.

تولى كاتيليه منصب مدير مرصد بروكسل خلفا للابلاس، ولكن مساهمته فى علم الإحصاء لم تكن فى مجال الفلك، بل فى مجال مختلف تماما. فقد كانت هواية لديه أن يغوص فى العلوم المتعلقة بالبشر، وقد جعل من الجنود مادة علمية له، فقاس صدور الجنود الاسكتلنديين، وقامات الجنود الفرنسيين، ورسم أشكالا بيانية لقياساته، ووجد أنها تمثل شكل الجرس، بمعنى أنها تدور حول قيمة متوسطة.

وتابع جالتون عمل كاليه، مطبقا لها فى مجال الوراثة، فقد كان مهتما بمعرفة ما إذا كان الذكاء خاصية تورث، وقاده ذلك إلى قياس خواص وراثية أخرى مثل الطول ولون العينين وغير ذلك. وقد كان اهتمامه بالذكاء نابعا من كونه عبقريا، استطاع القراءة فى سن الثالثة ودراسة اللغة اللاتينية فى الرابعة. كان موجها لامتحان الطب، ولكن حين ورث ضيعة ضخمة فى موعد تخرجه ترك هذه الدراسة وساح يضرب فى

الأرض. وقد حاول دراسة علم المعادن ثم تخلى عنه أيضا، ولكن حين بدأ دراسته الإحصائية عن الوراثة كان كمن عثر على منجم للذهب. كان الجدل محتدما حول ما إذا كان الذكاء وراثيا أم نتيجة للبيئة، ومن خلال دراسته الإحصائية بين أن الوراثة عامل هام فى ذلك، كما بين أن لها دخلا فى الكثير من الصفات الأخرى مثل الطول ولون الشعر، بل وجد أن لكافة الصفات الجسمانية بلا استثناء علاقة وطيدة بالوراثة.

وكما حدث بالنسبة لعلم الفيزياء أخذ علم الإحصاء يلعب دورا متزايدا فى مجال العلوم الإنسانية، بل إن التطور سار متوازيا بين العلمين، فما كان يكتشف فى أحدهما يستغل فى العلم الآخر. وهكذا رسخ المنهج الإحصائى كقرين للمنهج التحديدى الذى أسسه نيوتن. فالمنهج التحديدى ينجح فى النظم البسيطة، ولكنه يفشل تماما فى النظم المعقدة، والتى تمثل مجال المنهج الإحصائي. إن وصف سلوك العوامل المتعلقة بهذه النظم لا يكون على أساس قاطع بل احتمالي. لقد أدى هذا إلى شيء من عدم اليقين بالنسبة للتنبؤ، ولكن رغم ذلك كان أسلوبا ناجحا تماما.

ولم يكن بين الأسلوبين صلة واضحة، وقد ثارت التساؤلات عن احتمال وجود مثل هذه الصلة. ومن جهة أخرى فقد وجد أن مجال التطبيق للأسلوبين قاصر فى حالات كثيرة، فبالنسبة للأسلوب التحديدى وجد أنه يفشل تماما فى حالة نظام يضم أكثر من جسمين.

مشكلة الأجسام الثلاثة

كما ذكرنا آنفا واجهت نيوتن صعوبات جمة عند تطبيق قوانينه على نظام ثلاثى الأجسام مثل الشمس والأرض والقمر. وكما سنرى لقد لعبت هذه المسألة دورا هاما فى الكشف عن الهيولية، ومن ثم فهى تستحق منا عرضا تفصيليا.

تتمثل المسألة فى ثلاثة أجسام (تجرد كثلاث نقاط هندسية[1]) تتجاذب فيما بينها طبقا لقوانين نيوتن للجاذبية. فى الحالة العامة لا توجد محددات للكتل أو للظروف الأولية. ولكن الرياضيين اكتشفوا أن هذه الحالة أصعب من أن تعالج، فلجئوا إلى تبسيطها أملا فى إيجاد حل مبدئى لها قد يؤدى بعد ذلك إلى حل عام. ووضعت تصورات لعملية التبسيط، كأن يكون أحد الإجسام أصغر بكثير من الآخرين، أو أكبر بكثير منهما.

لمسألة الأجسام الثلاثة يطلب تسع كميات (تسمى بالكميات التكاملية) للحل الكامل. وقد توصل لابلاس لحل المسألة فى صورتها التقريبية، ولكنه عجز عن حلها فى صورتها العامة. لقد كان متصورا آنذاك أن الكميات التسع قابلة لأن يعبر عنها بمعادلات رياضية، ولكن جاءت الصدمة حين بين هـ. برونز عام ١٨٩٢ أن هذا ليس صحيحا، فالكميات رغم وجودها النظرى ليست كلها قابلة للتعبير الرياضي.

فى المسألة ثلاثية الأجسام يبدأ المرء بتحديد سرعات ومواضع للأجرام الثلاثة، ثم ينظر فى تحديد المواضع والسرعات بعد مرور وقت معين عن طريق حل المعادلات التفاضلية (تعطى المعادلات التفاضلية تغير الكميات مع الزمن). فى كثير من الأحوال تعود كمية ما إلى نفس قيمتها الأصلية، وتسمى هذه الكمية فى هذه الحالة "دورية". والظواهر الدورية مألوفة تماما فى الطبيعة، ويبدى العلماء اهتماما خاصا بها.

لننظر بعمق أكبر للمسألة، لنفرض أن لدينا ثلاثة أجسام، لتكن ثلاثة نجوم أو ثلاثة كواكب أو ما أشبه، طالما أنها مترابطة بالقوة التجاذبية. كل جرم كما علمت يسير فى مدار إهليلجي، وعلى ذلك فإن المسافات فيما بينها سوف تتغير باستمرار. يترتب على ذلك أن قوة التجاذب تتغير باستمرار. فى بعض الأحوال تعود السرعات إلى سابق عهدها، ثم تتغير عنها لتعود بعد نفس العدد من الدورات إلى سابق عهدها مرة أخرى، وهو ما نطلق عليه المسار الدوري. وقديما كان العلماء يعتمدون على المسارات الدورية لكى يصلوا منها إلى حلول للحالات غير الدورية. من هذه الأساليب أن يبدأ المرء بمسار دوري، ثم يدخل تغييرا طفيفا عليه وينظر للنتائج المترتبة على ذلك.

كان الأسلوب المتبع، ولا يزال، فى التعامل مع النظام الثلاثى مبنيا على أسلوب "الاضطراب perturbation . فى هذه النظرية تبدأ بحل معروف، مثلا حل النظام الثنائي، ثم تدخل تأثير الجرم الثالث، شريطة أن يكون ضئيلا. وقد وجد العلماء أن الأسلوب لم ينجح فى نظام الأرض والقمر والشمس، لأن تأثير الشمس ليس ضئيلا.

عند تطبيق نظرية الاضطراب يعطى الحل على صورة متسلسلة، على سبيل المثال: (١ + ٢/١ + ٤/١ + ٨/١ + ...) فى التطبيق العلمى يكتفى العلماء بالعناصر القليلة الأولى من المتسلسلة. ففى المثال المعطى قد يكتفى بالعناصر الثلاثة الأول، فيكون المجموع ١,٧٥ . (إذا وصلت المستلسلة إلى مالا نهاية، فإن المجموع يكون ٢، ومن ثم فإن المجموع المعطى يكون تقريبا معقولا، وكلما زادت العناصر المأخوذة اقتربنا أكثر

من المجموع[٢]). ويجب أن تكون المتسلسلة متقاربة حتى تعطى إجابة، أما إذا لم تكن كذلك فإن المجموع سوف يتصاعد إلى مالا نهاية (مثلا: ١ + ٢ + ٤ + ...) وتكون المتسلسلة بذلك متباعدة، ويكون اختيار العناصر الأول غير قريب من الحل الصحيح. أحد المشاكل الهامة فى مسألة النظام الثلاثى هى إثبات أن المتسلسلة متقاربة.

وظهر فتح جديد فى حل المسألة حين توصل جورج هِل George Hill من مرصد الماناك البحرى بالولايات المتحدة إلى طريقة جديدة لمعالجتها قرب نهاية القرن التاسع عشر. إلى ذلك الوقت كان الجميع يبدءون بمسارات إهليلجية ثم يضيفون الاضطراب للتعديل منها. وقرر هيل أن يبدأ بحل معروف لمسألة تقريبية، وفى هذه الحالة لن يكون الحل إهليلجيا خالصا. لقد كانت طريقة ناجحة اتبعها الكثيرون بعد ذلك.

بوانكريه، أوسكار الثاني والهيولية

أتت أول لمحة عن الهيولية من ناحية غير متوقعة. فى نهاية الثمانينات من القرن التاسع عشر أعلن عن جائزة بمناسبة عيد الميلاد الستينى لملك السويد أوسكار الثاني، تُقدم يوم ٢١ يناير من عام ١٨٨٩. وقد وضعت المسابقة على صورة أربع مسائل رياضية اختيارية وضعها الرياضى الألمانى كارل فيرشتراس.

ثلاث من المسائل كانت رياضة بحتة، أما الرابعة فكانت عن النظام الشمسي. فقبل ذلك بعدة سنوات سمع فيرشتراس عن معضلة متعلقة بالنظام الشمسي، هى مسألة استقرار النظام الشمسي. وكان الرياضى الألمانى جوليوس ديدكيند قد ألمح إلى أنه قد أثبتها رياضيا، إلا أنه لم يطلع أحدا على عمله، ومات قبل أن يفعل (إذا كان قد توصل إليه بالفعل!). وقد حاول فيرشتراس مع المسألة دون نجاح، فقرر أن يضيفها للمسابقة.

ما الذى تعنيه بكلمة استقرار؟ أفضل طريقة لفهم ذلك هى تصور صندوق فوق منضدة. فثقل الصندوق يضغط على المنضدة لأسفل، ويقابله رد فعل من المنضدة على الصندوق لأعلى، كلتا القوتين متساويتان فى المقدار ومتضادتان فى الاتجاه، فهما إذا متعادلتان، والنظام بأكمله مستقر. ولكن خذ الصندوق وأوقفه بحيث يتوازن على حرف له، يظل الثقل ضاغطا على المنضدة، ولكن هل النظام مستقر؟ لكى نجيب على السؤال نفترض تغييرا طفيفا فى الوضع، بإمالة الصندوق شيئا ما، ترى أن القوة الممثلة

للضغط لم تعد مارة بنقطة الارتكاز، فيختل التوازن وينقلب الصندوق. بقول آخر، فإنه حين يؤدى تغيير طفيف إلى تغيير كبير فى النظام، فإن النظام لا يكون مستقرا.

كيف ينطبق هذا على النظام الشمسي؟ لو كان النظام غير مستقر لأدى تغيير بسيط، وليكن فى قوة تجاذب ضعيفة بين كوكبين، إلى تغيير هائل فى النظام. ونحن نعلم أن الكواكب تدور حول الشمس منذ بلايين السنين بنفس الطريقة تقريبا، وعلى ذلك فالنظام يبدو مستقرا. ولكن هل يحتمل رغم ذلك أن يكون مسار كوكب ما عرضة لتغيير طفيف فى لحظة ما، فيدفع بكوكبه إلى خارج المجموعة؟ لقد بحثت هذه المسألة فى نهاية القرن التاسع عشر.

تصاغ المسألة إذن على الوجه التالي: هل النظام الشمسى مستقر؟ إن كل ما تم توصيفه فى الواقع كان حلا على صورة متسلسلة متقاربة، توحى بالاستقرار. وأحد العلماء الذين قتلوا الموضوع بحثا كان هنرى بوانكريه من جامعة باريس.

ولد بوانكريه عام ١٨٥٤ فى مدينة نانسى بفرنسا، ويطلق عليه أحيانا بأنه آخر "الشاملين"، بمعنى أنه آخر شخص يقوم بأعمال تشمل كافة فروع الرياضيات. لم يكن فى الواقع على دراية تامة بكافة فروع هذا العلم فقط، بل لقد قدم مساهمات هامة فى أغلبها. لم يعد أحد بعده قادر على ذلك، ولا ينتظر لأحد أن يفعل، لقد أصبح علم الرياضيات غاية فى التعقيد.

كانت شهرة بوانكريه عريضة لدرجة أن برتراند رسل حين سئل فى نهاية الحرب العالمية الأولى عن أعظم فرنسى فى العصر الحديث أجاب بلا تردد: "بوانكريه". ولما ظن السائل أن رسل يشير إلى ابن عم هنري، ريموند بوانكريه، الذى تقلد الحكم فى فرنسا، قطب جبينه وقال معترضا: "لا، ليس بوانكريه"، فرد رسل على الفور: "إنما أقصد هنري".

ورغم هذه المكانة العالمية، فلم يكن بوانكريه مبشرا بأمل كبير فى مطلع شبابه. لقد كان نابها فى اتجاهات معينة، بطيء التفكير فى غيرها. كان يقرأ بنهم، ويتمتع بذاكرة فوتوغرافية تمكنه من استدعاء ما يقرؤه بكل سهولة، ولكن حالته الجسمانية كانت على غير ما يرام. كان يعانى من قصر نظر وعدم تركيز فى الرؤية، ويعطى انطباعا بتخلف عقلى خفيف.

ولكن قصر نظره أعطاه ميزة فى ناحية أخرى، فلكونه غير قادر على رؤية السبورة كان يعتمد بقدر كبيرعلى تخزين ما يسمعه فى ذاكرته. وبعد حين أدرك أنه غير محتاج لأخذ ملاحظات عن المحاضرات، فهو قادر على استظهار كل ما سمعه، بل وإضافة تعليقات تدل على حسن الفهم.

بدأ تعلقه بالرياضيات وهو فى الخامسة عشرة، وفى هذا العمر كانت مقدرته على إجراء الحسابات فى ذهنه حادة لدرجة أنه نادرا ما كان يلجأ للورقة والقلم لإجرائها. وفى سن السابعة عشرة تقدم لامتحان القبول للجامعة، إلا أنه بسبب وصوله متأخرا فإن الحظ خانه، ولم يوفق فى مادة الرياضيات. ولكنه تعلم درسا لم ينسه. فحاز المرتبة الأولى فى مادة الرياضيات فى امتحان التقدم إلى مدرسة٢ فورستراي، وفى الإيكول البوليتكنيك "تقابل كلية الهندسة" استعاد إبهار أساتذته بمقدرته الرياضية.

وفى عام ١٨٧٥ انتقل إلى مدرسة مينز، كان يؤهل أن يكون مهندسا، ولكن البرنامج الدراسى كان يتيح له مواصلة الدراسة فى الرياضيات، وسرعان ما وضح أن موهبته فى ذلك سوف تفقد لو واصل دراسة العلوم التطبيقية. وبعد ثلاث سنوات منح درجة الدكتوراه من جامعة باريس عن عمل بدأه وهو بمدرسة مينز، وقد علق أحد الممتحنين على رسالته قائلا إن فيها ما يكفى عدة رسائل جامعية جيدة.

والتحق بجامعة كاين كأستاذ للرياضيات، ولكن إقامته لم تطل هناك، فعاد إلى جامعة باريس، حيث كان وهو فى سن السابعة والعشرين أصغر أستاذ بها. وبعد وصوله بفترة قليلة سمع عن جائزة أوسكار الثاني.

كان تحديا لا يمكن أن يتجاهله. ففوزه بالجائزة من شأنه أن يرفع مكانته فى أوربا بأسرها، وهو ما يحتاج إليه فى بداية مسيرة حياته العلمية، واختار مسألة استقرار النظام الشمسي. كان نظاما يحتوى عند أول درجة من التقريب على تسعة أجرام، الشمس وثمانية كواكب (لم يكن بلوتو قد اكتشف بعد)، على أنه من وجهة التطبيق العملى فإن الأعضاء الصغار من المجموعة الشمسية تسبب اضطرابات فى مسار الكواكب الأخرى تجعله نظاما من خمسين جرما.

رأى بوانكريه أن عليه أن يلجأ للتقريب فى البداية، حتى بالنسبة لنظام تسعة أجرام، فبدأ بنظام ثلاثي. ولكن كم كان إحباطه حين صدم بمدى صعوبة المسألة حتى

عند هذا المستوى من التبسيط. كان على دراية بأسلوب هيل (ابدأ بحل تعرفه لحالة خاصة) وجعل منه نقطة انطلاقته. وكما رأينا سابقا فإن برونز قد أثبت أنه ليس كافة المقادير التكاملية يمكن وضعها على صورة معادلات بسيطة. وعلى ذلك فقد قرر بوانكريه اللجوء لطريقة التمثيل الهندسي.

بدأ بوانكريه فى رسم ما يسمى بـ "فضاء الطور"، وهو شيء آخر خلاف الفضاء المألوف لنا. ففى تمثيل الفضاء العادى ترسم مواضع الكوكب مقابل الزمن، فنحصل على المسار الإهليلجى المعروف. ولكن العلماء من أمثال لاجرانج وهاملتون وغيرهم وجدوا أنه أكثر فائدة لهم أن ترسم المواضع مقابل السرعة (أو بالأحرى كمية التحرك، وهى حاصل ضرب السرعة فى الكتلة). أصبحت إحداثيات الشكل على هذا الأساس هى كمية تمثل الموضع (تسمى "م") مقابل كمية تقابل كمية الحركة (تسمى "ن").

وعلى ذلك فإنه برسم "م" مقابل "ن" نحصل على فضاء الطور، بينما حين نرسم "م" مقابل "ز" الزمن نحصل على مسار الكوكب. ولما كان التعامل مع ثلاثة مسارات فى فضاء الطور أمرا شاقا، فقد بسط بوانكريه المسألة بافتراض أن أحد الأجرام أخف بكثير عن الجرمين الآخرين.

وتجلت عبقرية بوانكريه خلال حل هذه المسألة، ذلك أنه بدلا من النظر للمسارات بأكملها، تخيل أنه يأخذ مقطعا لها، وهى ما نسميه اليوم "مقاطع بوانكريه Poincaré sections". ففى كل مرة يقطع مسار الكوكب صفحة وهمية متعامدة عليه، يسجل نقطة عليها.

أخذ بوانكريه يسجل النقاط واحدة بعد الأخرى. من السهل تمييز حالة المسارات الدورية، فبعد عدة خطوات سوف يمر المسار فى النقطة الأولى مرة أخرى، ثم الثانية، وهكذا، ثم يعاد الشكل برمته مرة أخرى.

إن الهدف النهائى بطبيعة الحال هو استقرار النظام الشمسي، ولذا فإن كافة الخطوات يجب أن تكون موجهة إلى ما له علاقة بالاستقرار. وقد رأينا سابقا أن هذا يعنى تقارب المتسلسلة الناتجة عن الحل، وهو ما كان بوانكريه واثقا منه.

ولكن ثقته لم تتحقق، فلم يستطع أن يثبت أى تقارب، وبالتالى لم يثبت استقرار النظام الشمسي. على أن حكام الجائزة وجدوا فى بحثه المكون من ٢٠٠ صفحة من

المستوى العلمى ما يؤهله للحصول على الجائزة. وكانت المفاجأة بعد حصوله عليها وإرسال البحث للنشر أن لاحظ فيها إدوارد فراجمان خطأ جوهريا، فأوقف المحرر النشر وطلب من بوانكريه إعادة النظر فيها، ومن عجب أن تكون هذه المراجعة سببا فى اكتشاف حالة الهيولية.

بدأ بوانكريه يلقى نظرة أكثر دقة على الأشكال الناتجة عن مقاطع فضاء الطور، خاصة المناطق التى لم تظهر بها دورية خالصة. فى مثل هذه الحالة لن تكون النقاط متكررة، فماذا تكون عليه حالتها إذن؟ سوف تتناثر بعد عدة خطوات قلائل متبعثرة فى شتى الاتجاهات. وهذا ما حدث، لقد بدأ الشكل يتخذ هيئة غريبة المنظر، بعض المناطق مكدسة بالنقاط، وبعضها الآخر خال تماما منها. سرعان ما تبين لبوانكريه أن مسار الكواكب لا يمكن أن يحسب بهذه الطريقة على الإطلاق، وبالتالى لا يمكن التنبؤ به فى المستقبل البعيد. إن مضمون العملية أن النقاط لا تتقارب، بل تتباعد.

كانت صدمة بالنسبة لبوانكريه. لقد أعاد كتابة البحث الذى تضخم إلى ٢٧٠ صفحة عند نشره، ولكنه لم يحاول متابعة رسم النقاط يأسا وإحباطا لمدى تعقدها. إن ما رآه حقا كان أول لمحة للهيولية.

وما فعله بوانكريه فى وقته يدويا تقوم به الحواسب الآلية فى وقتنا هذا، فبدلا من عشرات أو حتى مئات من نقاط تقاطع فضاء الطور مع شريحته التخيلية يمكننا أن نرى الملايين منها، تقابل الملايين من المسارات للكوكب.

(١) تعتبر كتلة الأجسام مركزة فى مركز الأجسام، حتى لا تدخل أبعاد الأجسام فى التحليل تبسيطا للحل. – المترجم

(٢) من الملاحظات الهامة، والطريفة، أن كلمة مدرسة تعنى أحيانا كلية جامعية، ولذا يقال إن محمد على أنشأ "مدرسة الطب، ومدرسة الهندسة..." – المترجم

الفصل الرابع

إرساء الأساس لفهم الهيولية

فى الفصل السابق ألقينا نظرة موجزة على الهيولية وأحد الوسائل الهامة للغاية التى تحت أيدينا لدراستها، ونقصد بذلك فضاء الطور. إن فضاء الطور يلعب دورا من الأهمية فى هذا الموضوع بما يبرر أن نتوقف لإلقاء نظرة أكثر عمقا عليه.

نظرة أعمق لفضاء الطور

إن فضاء الطور هو فضاء النظم الديناميكية، ويقصد بها النظم التى تتضمن عنصرا متغيرا أو أكثر. وأقرب مثال لهذه النظم كرة ألقيت فى الهواء. ما الذى نحتاجه لنصف مسارها وصفا كاملا؟ إننا نحتاج إلى سرعتها الابتدائية مقدارا واتجاها، وارتفاعها عن الأرض لحظة قذفها. وما أن نعرف ذلك حتى نكون قادرين على معرفة كل شيء عن هذا النظام، فهذه الظروف الأولية تعطينا "حالة" النظام.

ولكنا نريد أيضا أن نعرف كيفية تغير هذه الحالة مع الزمن، قانون يصف تصرف النظام مع مرور الزمن ويساعدنا على التنبؤ بالحالة فى أية لحظة مستقبلية. يصاغ مثل هذا القانون عادة فى صورة معادلة تفاضلية. وفى حالة الكرة فإنه بمعرفة الظروف الأولية المشار إليها بعاليه، فإنه يمكننا من تطبيق ذلك القانون أن نضع صيغة رياضية تعطينا السرعة والموضع للكرة فى أية لحظة من المستقبل.

هذا الأسلوب الذى يربط بين التغير والزمن كان المتبع على مدى السنين. ولكن بمرور الوقت وجد العلماء أنه لا يفى بكافة متطلبات تحليل النظم. هذا هو الموقف الذى واجهه بوانكريه وغيره فى تحليل النظام ثلاثى الأجسام. فما الذى فعلوه؟ لقد لجئوا للهندسة، ليست تلك الهندسة الإقليدية التى درسناها بالمدارس، بل الهندسة بمعنى أعم

وأشمل. لقد لجئوا للأشكال، فالهندسة تعطينا وسيلة للتعبير عن الأعداد بواسطة الأشكال. إن هذا ما نفعله حين نرسم مسار الكرة المقذوفة. بعبارة أخرى يمكننا أن نصوغ علاقة تربط بين السرعة والزمن مثلا يمكن أن تعطينا السرعة عند أية لحظة، أو أن نرسم منحنا نعرف منه ذلك مباشرة. إن الأسلوبين يعطيانا الحل المطلوب

فحين يكون بين يدى العلماء نظاما يصعب حله بطريقة المعادلات (الحل الجبرى أو التحليلي) فإنهم يلجئون للوسيلة الأخرى، وهى الحل الهندسي.

حقول التجارب لدراسة الهيولية

إن نقطة البدء المعتادة لدراسة الهيولية هى البندول. والهيولية ليست مقصورة بطبيعة الحال على النظم الفيزيائية، فهى تخترق كافة مجالات العلم، بما فى ذلك العلوم الاقتصادية والتجارية. ولكننا سوف نقصر عرضنا على العلوم الفيزيائية.

إن البندول نظام من البساطة لدرجة أننا قد لا نتوقع أن نتعلم منه الكثير، إذ يبدو للوهلة الأولى أن كل ما يمكنه أن يفعله هو التأرجح يمنة ويسرة. على أننا سوف نرى أن لديه الكثير مما تهمنا دراسته.

كان جاليليو هو أول من أدرك إحدى العلاقات الهامة للبندول. إن الشيء الذى أثار انتباهه هو أن زمن الأرجحة لا يعتمد على المدى الذى تجذب إليه الثقل (سعة الذبذبة). فإذا ما شددته إلى مسافة أكبر، كانت سرعته أعلى فيقطع نفس الدورة فى نفس الزمن. فقط بتغيير طول الذراع يمكن تغيير زمن الدورة. على أن هذا القول ليس دقيقا تماما، فهو لا يصدق إلا على حالات الإزاحة الصغيرة.

أدرك جاليليو أن البندول يمكن أن يستخدم لقياس الزمن، فقد كانت مشكلة قياس الزمن بدقة تؤرقه طوال حياته. ولكنه لم يستطع خلال تجاربه أن يحسن من البندول ليؤدى هذا الغرض.

وتحسنت الساعات البندولية، ولكن دورة البندول تذوى مع الزمن، ولابد من إعطائه دفعة كل دورة ليحافظ على حركته مستمرة. والشخص الذى تمكن من القيام بذلك هو الهولندى كريستيان هايجنز Christian Huygens .

ولد هايجنز فى لاهاى عام ١٦٢٩، والتحق بجامعة ليدن، حيث درس الرياضيات، ولكنه سرعان ما أصبح مهتما بالفلك والفيزياء، حيث كانت أهم إنجازاته. حقيقة لم

يكن إنجازه فى الرياضيات قليلا، إذ يرجع إليه الفضل فى وضع أول نظرية عن الاحتمالات، إلا أن إنجازاته فى الفلك كانت عظيمة، فقد حسن من صناعة التلسكوبات، واستخدمها فى اكتشاف أكبر أقمار زحل، كما قام رسم صور تفصيلية للمريخ.

إلا أن أهم إنجازاته فى الواقع كانت فى اختراع الساعة البندولية. لم يكن مستخدما لقياس الزمن آنذاك إلا وسيلتان ليس لهم من الدقة إلا حظ جد ضئيل، أولهما الساعة المائية، والثانية عبارة عن ثقل يسقط بفعل الجاذبية. كان المطلوب جهازا يقيس الفترات الصغيرة من الزمن، وبدت الساعة البندولية مناسبة تماما لهذا الغرض. بين هايجنز أنه بتعليق ثقل فى بكرة متصلة بالبندول، ومع ضبط النظام ككل، يمكن للثقل أن يحافظ على البندول متحركا. كان فتحا مبينا، وسرعان ما انتشرت الساعات البندولية فى كافة أرجاء القارة الأوربية.

إننا سوف نعرض لعدة أنواع من البندولات، لكنى قبل أن أبدأ أريد أن أوضح أن البندول يمثل فى الواقع نظاما يضم العديد من الصور، تسمى "المذبذات "oscillators، من ذلك مثلا كرة تتدحرج على سطح منحن، أو قضيب مرن مثبت من طرف ويهتز عند الطرف الآخر. كل هذه الأشياء يمكن أن تثير ظاهرة تماثل ظاهرة البندول.

لنبدأ بالتمييز بين البندول الحقيقى والمثالي. إن البندول الواقعى تخمد حركته بسبب الاحتكاك أو مقاومة الهواء إلى أن يتوقف، أما فى البندول المثالى فإن قوى المقاومة للحركة تهمل، فيتصور أنه مهتز للأبد. بالطبع لا يوجد فى الطبيعة شيء من هذا القبيل، ولكنه تبسيط من أجل الدراسة النظرية. أما إذا درسنا حالة بندول مثل بندول هايجنز، أى يتضمن تعويضا للطاقة، فإن البندول فى هذه الحالة يطلق عليه البندول "القسرى ."forced

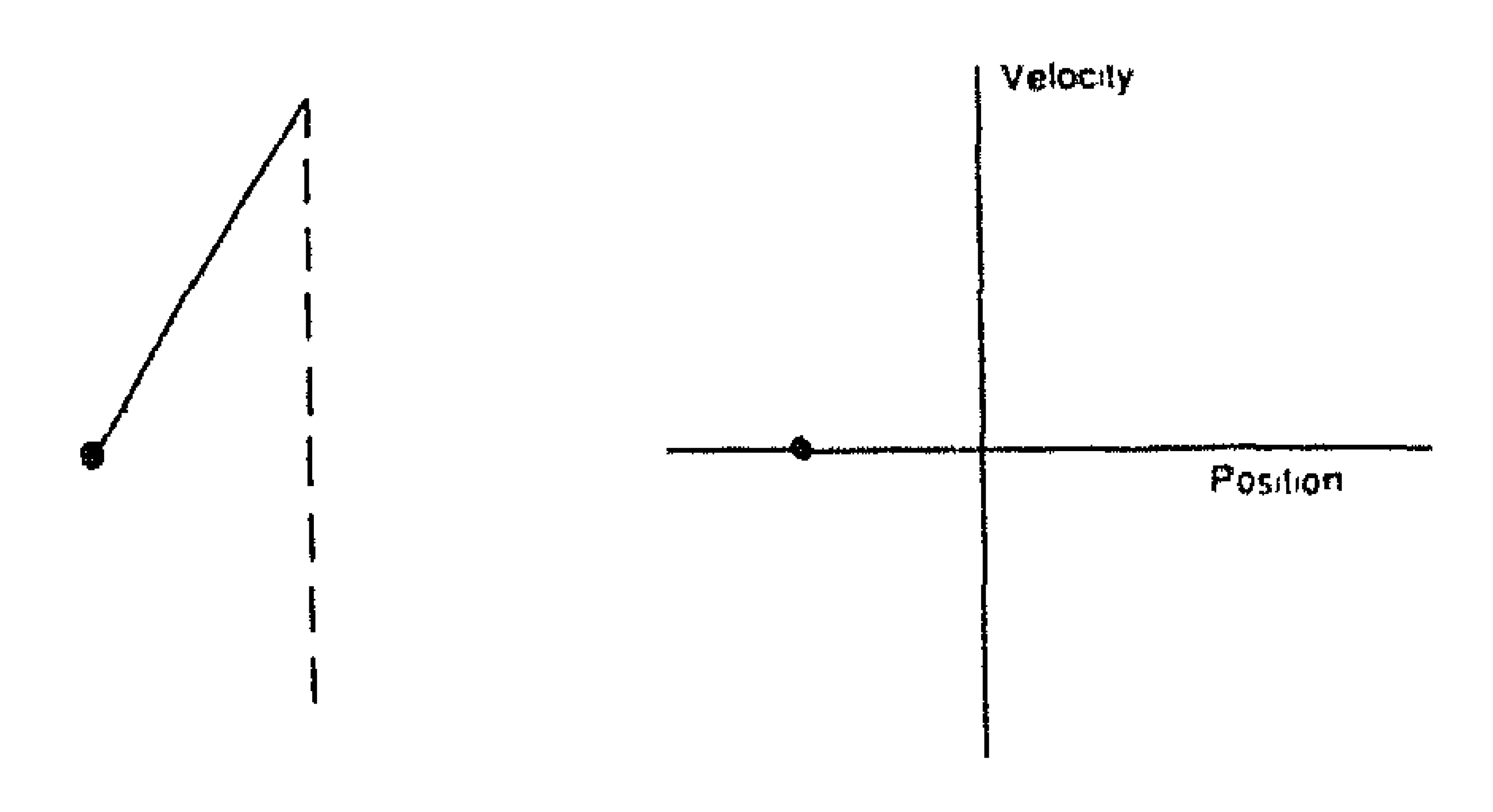
ولنبدأ بالبندول المثالى البسيط.

البندول فى فضاء الطور

من الأسباب التى تدعونا للبدء بمثال البندول هو سهولة رسم فضاء الطور له. فهو أولا ثنائى الأبعاد، بمعنى أن المطلوب هو تمثيل متغيرين فقط، السرعة والموضع. لنجعل المحور الأفقى معبرا عن الموضع، والمحور الرأسى معبرا عن السرعة.

لنفرض أننا جذبنا الثقل إلى جانب ما وأخذنا لقطات لحركته كل عُشر ثانية مثلا. قبل أن نرسل الثقل يكون مزاحا عن نقطة الاتزان بمقدار ما، ولكن سرعته لا تزال

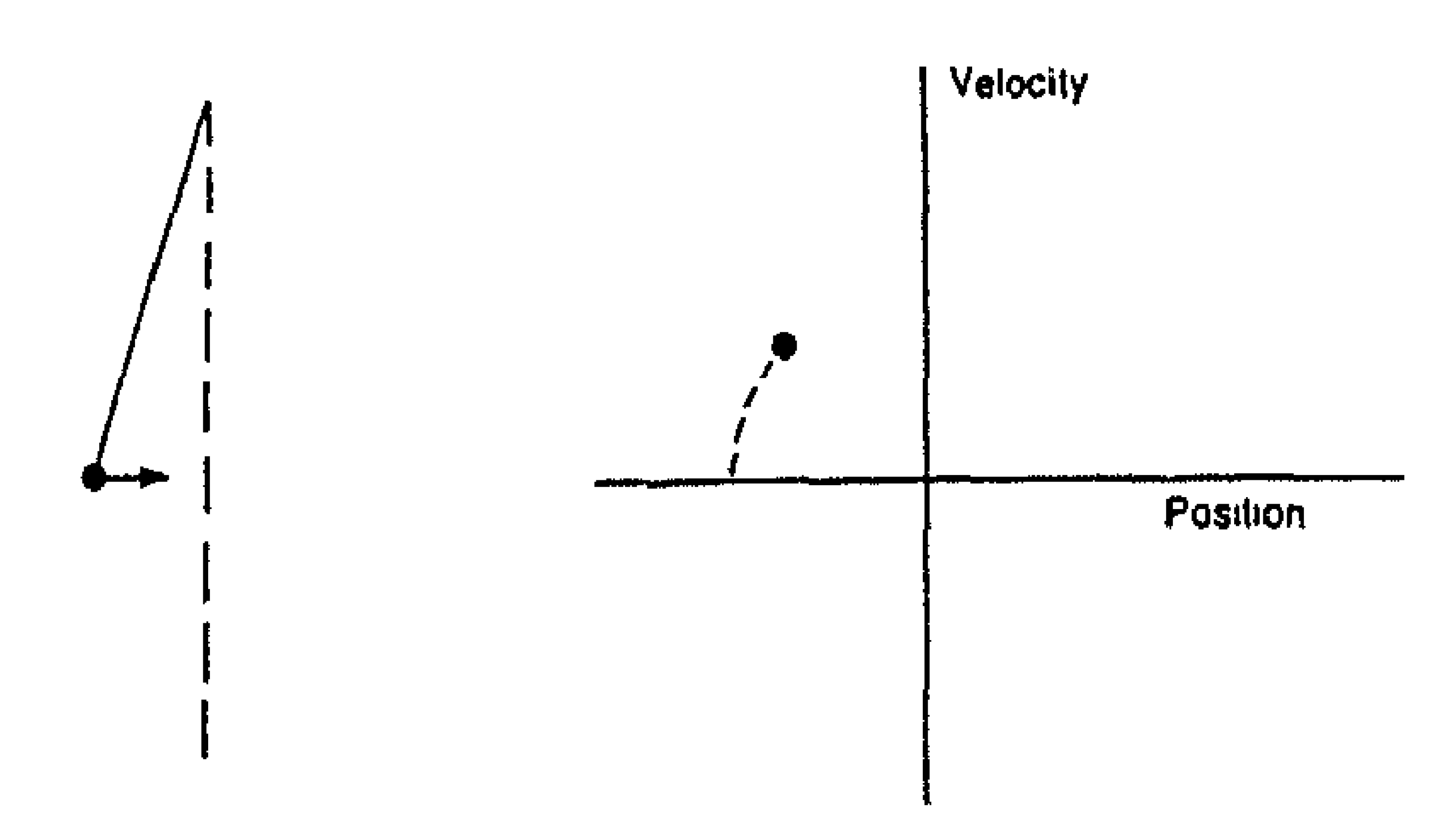
صفرا. إن النقطة المعبرة عن هذا الوضع هى نقطة على المحور الأفقى مزاحة لأحد الجانبين (انظر الشكل).



بندول فى بداية تأرجحه

وعندما نرسل الثقل يكتسب سرعة تتزايد مع الزمن إلى أن تصل إلى قيمة ما، فكيف نحسب سرعة وموضع الجسم كل فترة من الفترات التى حددناها؟ يتم ذلك عن طريق حل المعادلة التفاضلية التى تصف هذه الحركة.

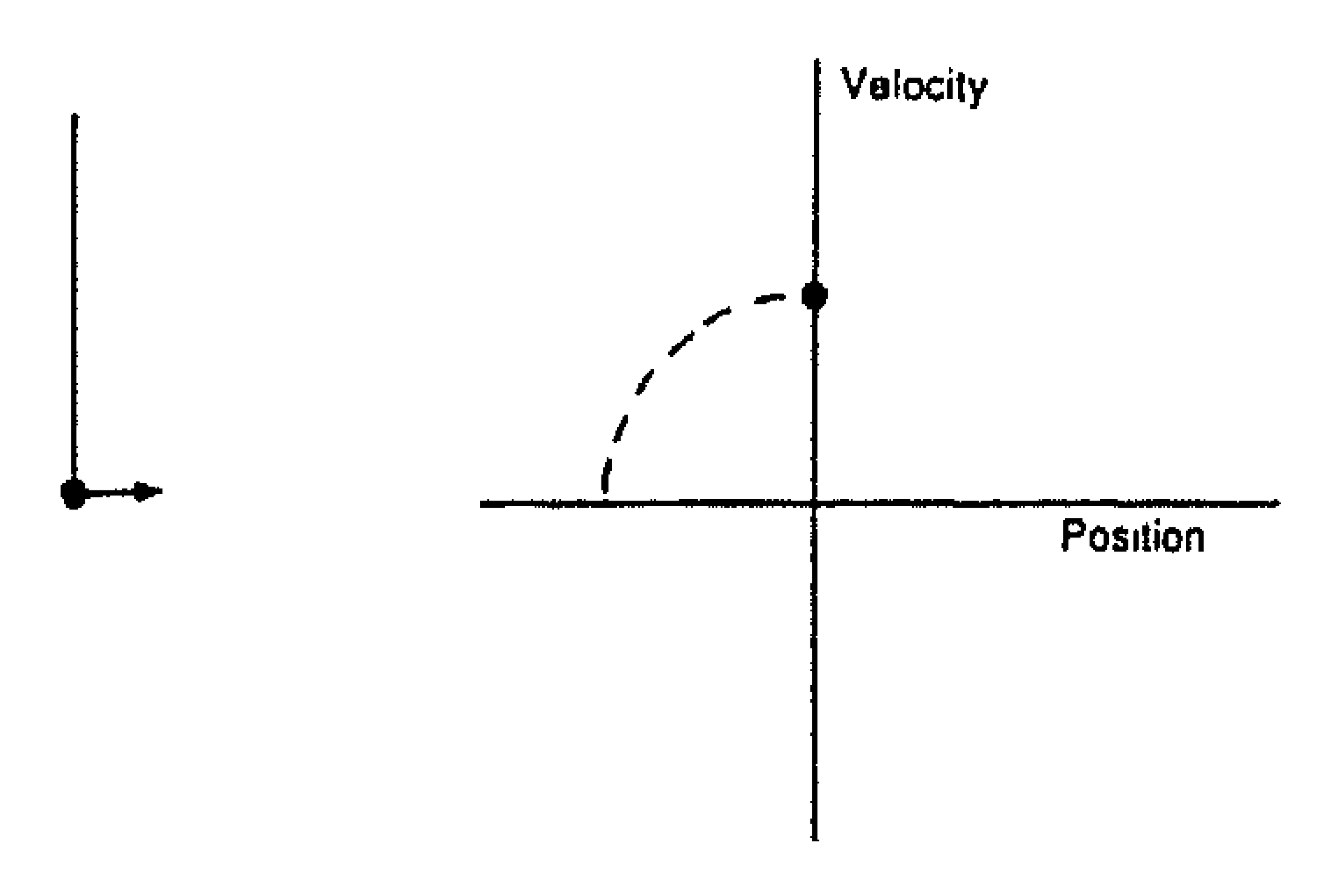
كلما تحرك الثقل تحققت نقطة جديدة على الشكل، حالة جديدة من حالات فضاء الطور، وبالمناسبة، يطلق على فضاء الطور أحيانا فضاء الحالات، لكونه يمثل حالات النظام. ويبين الشكل التالى الحالة الجديدة للنظام:



البندول فى لحظات التأرجح الأولى، السرعة منخفضة

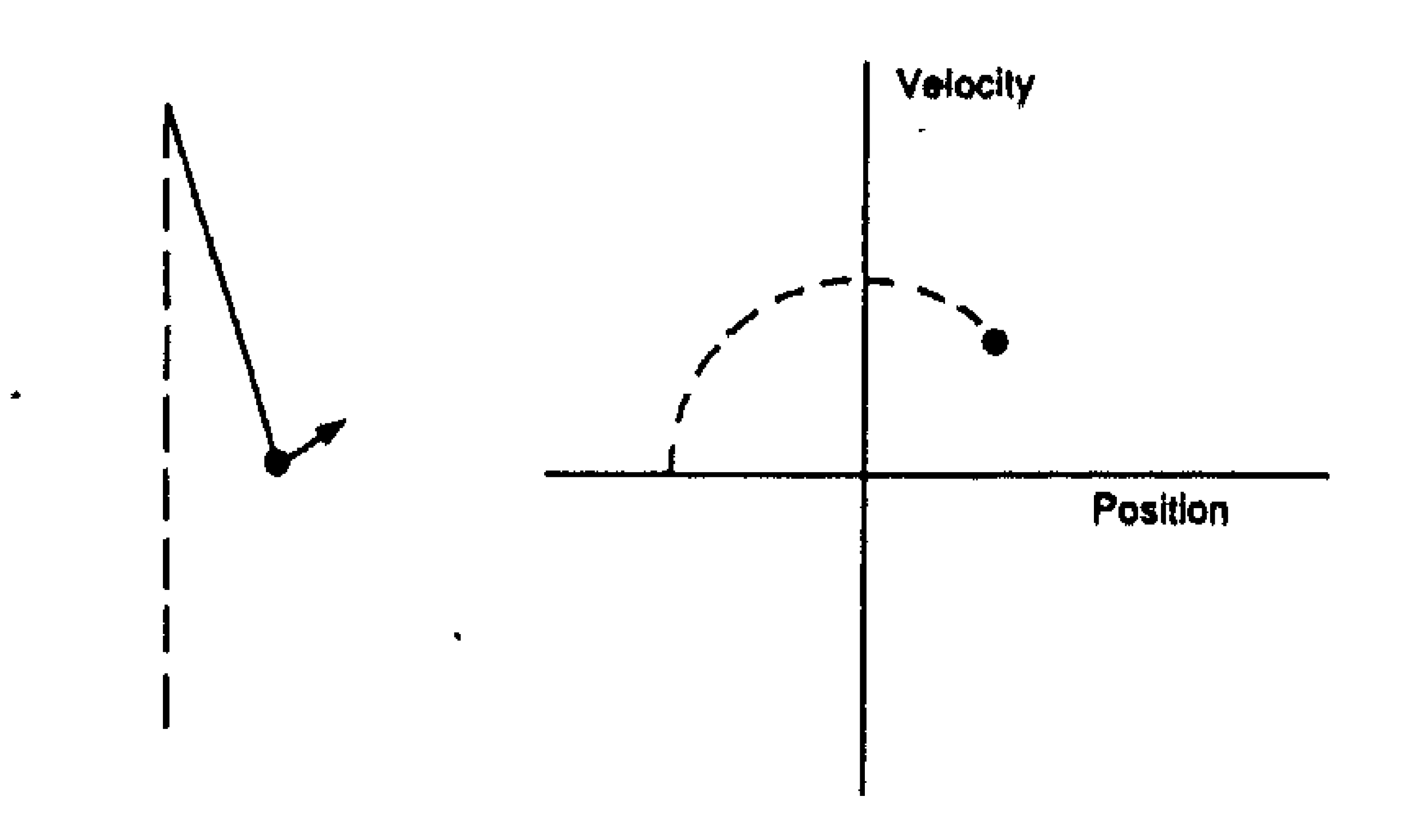
الرقمان يحددان الموضع مقابل السرعة في فضاء الطور

ومع استمرار حركة الثقل نجد أنه يصل إلى سرعته القصوى عند وصولة لنقطة الاتزان، وهى النقطة الممثلة فى الشكل التالي:

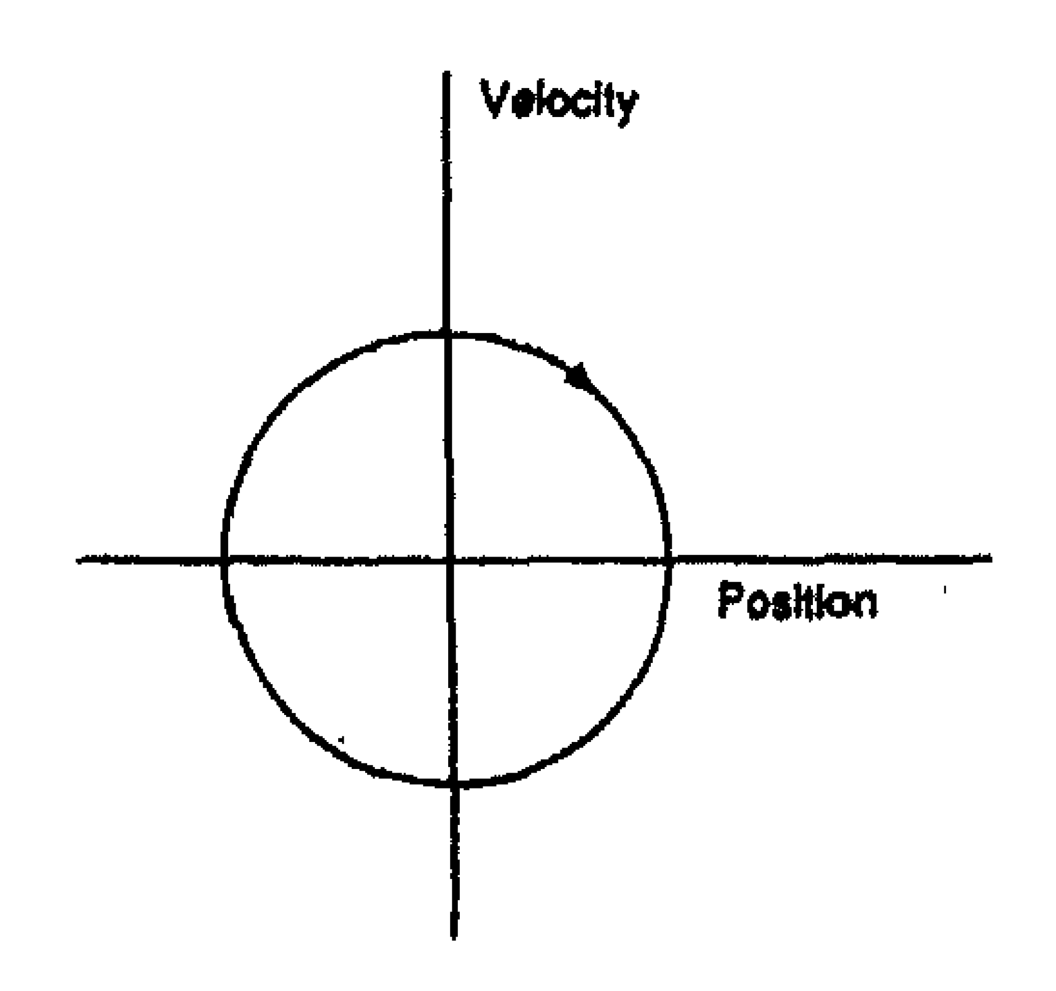


البندول فى الموضع الأدنى، السرعة فى أقصى قيمتها

ما الذى يحدث بعد أن يصل الثقل إلى نقطة الاتزان عند أسفل نقطة لمساره؟ إنه يتحول من هبوط إلى صعود فى الاتجاه المضاد، وهو الاتجاه الموجب بالنسبة للشكل الذى نحن بصدده. ومع صعوده تتناقص سرعته إلى أن يتوقف عند نقطة مساوية فى الارتفاع لنقطة بدء حركته. ومن نقطته تلك يهبط مرة أخرى، ليعبر نقطة الاتزان فى سرعته القصوى، ثم يعود للصعود إلى أن يصل لنقطة البداية، ليبدأ دورة جديدة. تمثل هذه الدورة بالدائرة المبينة بالشكل التالى، ويسمى ذلك بمسار الجسم. ولما كان المسار مغلقا، فإننا نطلق عليه مدار.



البندول بعد عبوره الموضع الأدنى



السرعة تتناقص من جديد

المسار الكامل للبندول

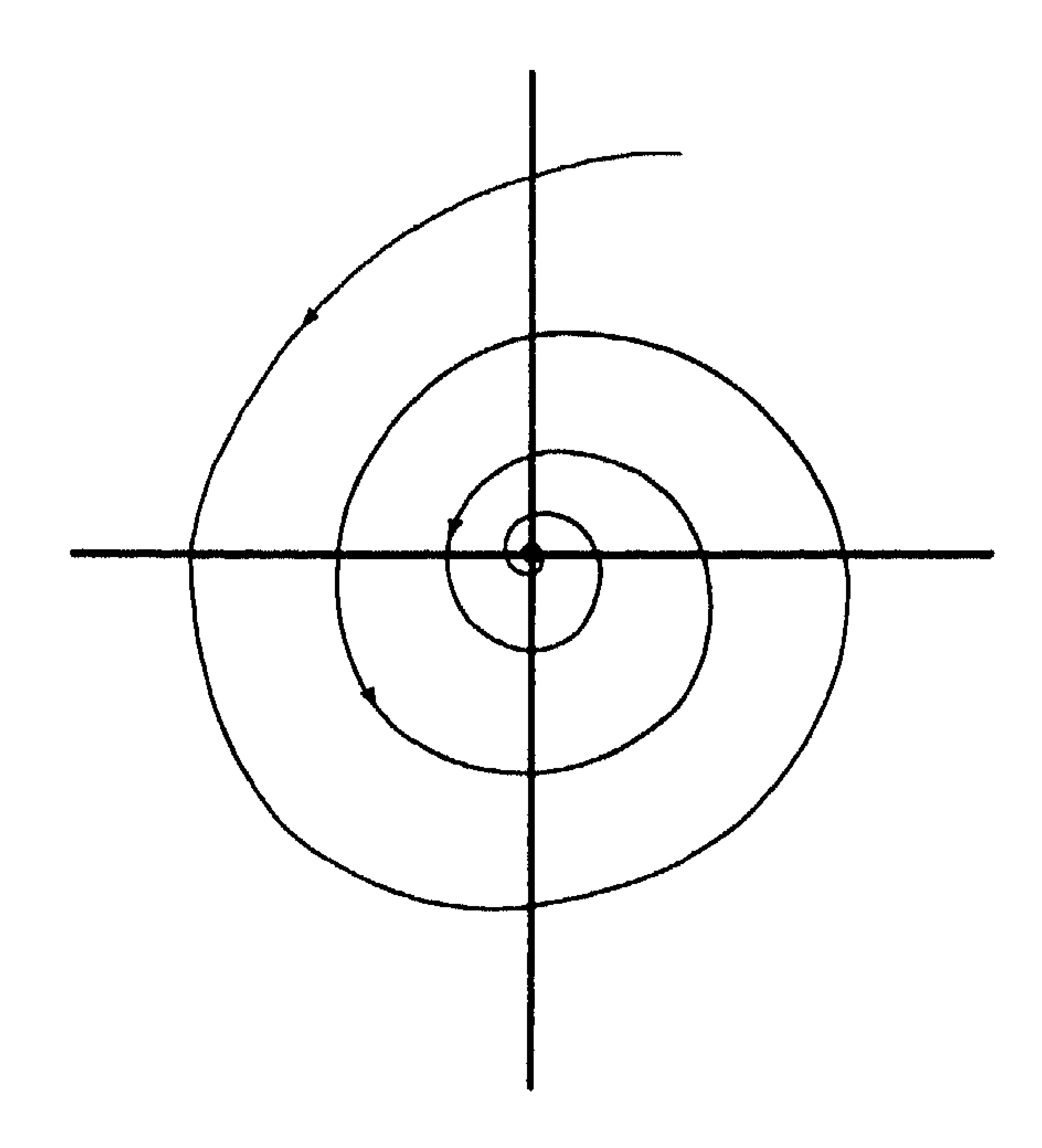
بعد أن تنتهى من رسم المسار لحركة جسم، فإنه يكون بإمكاننا أن نستخلص ما نشاء من بيانات منه. قد يبدو أن هذا تعقيد للموقف، فمعادلة البندول من البساطة لدرجة أن معادلة حركته تغنينا عن هذا العناء، ولكنا ذكرنا من قبل أنه ليست جميع النظم الديناميكية بهذه البساطة.

ولو أننا جذبنا البندول بدرجة أكبر، ثم رسمنا المسار مرة أخرى، فإننا نحصل على نفس الشكل الدائري، ولكن بقطر أكبر. ولو أننا رسمنا المسارات لمجموعة مختلفة من نقاط البدء، فإننا نحصل على عدد من الدوائر المتداخلة متحدة المركز. إن مسارا واحدا فى فضاء الطور يطلق عليه "مخطط الطور" phase diagram، أما المجموعة من هذه المسارات فيطلق عليها "المصور الطوري" phase portrait.

كما تلاحظ أن الاتجاهات ذات مغزى هام بالنسبة لمسارات فضاء الطور، ومن ثم فمن المفيد أن ننظر إليها على أنها نوع من "التدفق" flow 1.

وكما نوهت سابقا، فإن هذه الحالة نظرية مثالية، لا مجال لحدوثها فى العالم الواقعي. ففى الواقع تعمل قوى المقاومة للحركة كالاحتكاك ومقاومة الهواء على إخماد حركة البندول، ونطلق على هذه النظم "نظم تشتتية" dissipative، والآن، كيف يبدو المسار بالنسبة لنظام واقعي؟

لنجذب الثقل جانبا مرة أخرى، ثم نرسله. نلاحظ أن سعة الأرجحة تتناقص رويدا رويدا، إلى أن يستقر الثقل فى موضع سكونه. إن مسار الثقل فى هذه الحالة سوف يكون لولبيا ينتهى عند نقطة الأصل من الشكل. إنه مسار مختلف تماما عن مسار الحركة المثالية.



مسار لنظام واقعى فى فضاء الطور

لعلك تتساءل عن الحاجة لكل هذا العناء، وعلاقته بموضوع الهيولية. إنى أستميحك الصبر، فسوف ترى عما قليل أن هذا الأسلوب مفيد فى التعرف على أكثر ما فى موضوع الهيولية من إثارة.

اللاخطية

إن كل ما قلناه حتى الآن هو من قبيل التقريب. فعدم اعتماد زمن التأرجح على سعة الأرجحة لا يكون إلا على مستوى صغير للغاية من هذه السعة، وهو ما يجعل

البندول فى هذه الحالة صورة مبسطة من الواقع. ولكن إذا حاولنا حل مسألة البندول للسعات الواقعية وجدنا المسألة أعقد من ذلك بكثير. إن البندول نظام لاخطي، والنظر إليه كنظام خطى هو التقريب الذى أشرنا إليه.

وينطبق هذا القول على كافة النظم التذبذبية، فحين ترسم مسار حركة خطية تراها خطا مستقيما، وكذلك فإن كافة المذبذبات خطية حين ننظر لحالة السعة الصغيرة للذبذبة، ولكن بعد مرحلة معينة تتحول إلى اللاخطية. والتصرفات الخطية تمثل بمعادلات خطية، أما اللاخطية فتمثل بمعادلات لاخطية.

ومن جهة أخرى فإنه حين تكون المعادلة خطية يمكن جمع حلين معا للوصول إلى حل ثالث. إن المعادلات الخطية سهلة فى الحل بدرجة كبيرة، أو على أحسن الفروض قابلة للحل من ناحية المبدأ، أما المعادلات اللاخطية فهى من ناحية المبدأ غير قابلة للحل. إن كل من درس الرياضيات.إلى إنهاء المرحلة الجامعية يعلم أن العلوم فى مجملها تدور حول الظواهر الخطية. فالمعادلات اللاخطية ظلت مهملة طوال السنوات، فهى إما مستعصية تماما على الحل، أو لا حل لها أصلا. فلماذا إذن نشغل أنفسنا بها؟

وسار التعليم على هذا التصور، النظر للطبيعة على أن تصرفاتها خطية بصفة أساسية، ومن ثم التعمق فى طرق حل المعادلات الخطية إلى أكبر درجة من التمكن، ثم تجاهل ما عدا ذلك من ظواهر على أنها استثناء لا يتسحق عناء البحث فيها.

وبالتدريج، خلال السبعينات والثمانينات بدأ العلماء يدركون وجه الخطأ فى مسلكهم هذا. ليست تصرفات الطبيعة خطية، بل العكس هو الصحيح تماما، إن الظواهر الخطية هى الاستثناء وليس الأصل.

كان لهذا الاتجاه وقع الصدمة. وتطلب الأمر منهجا جديدا للتفكير العلمى ليس فى نظرته للطبيعة فحسب، بل لفروع العلم المختلفة أيضا، كالاقتصاد والعلوم الاجتماعية. على أن الصدمة لم تكن فى الاضطرار لمواجهة الظواهر غير الخطية، فالعلماء لديهم على الأقل الأسلوب الهندسى لمواجهتها، بل كانت متمثلة فى ظهور حالة لم يعرفها العلم من قبل، إنها حالة الهيولية.

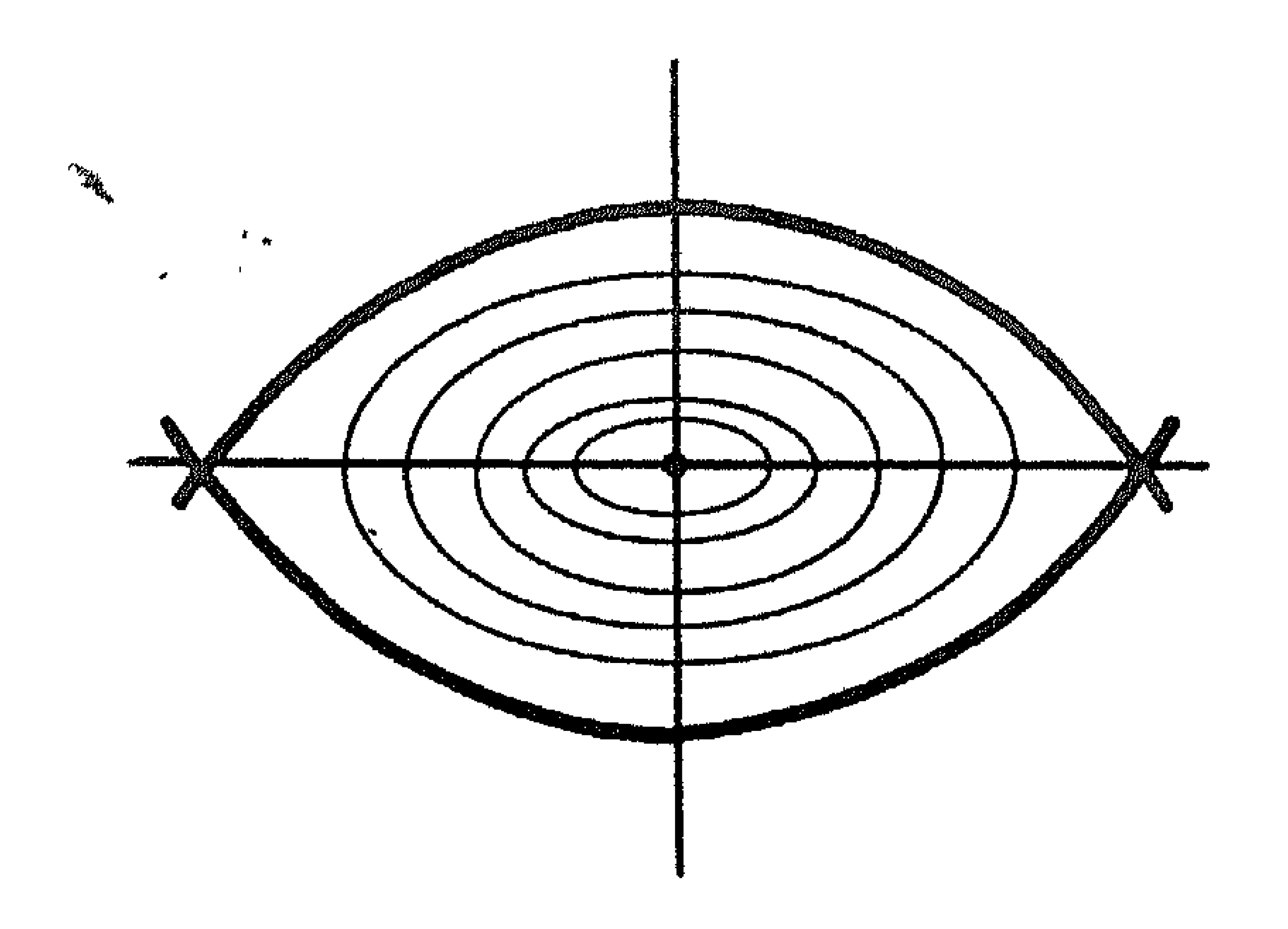
وليست حالة الهيولية جديدة، فنحن نشاهدها من حولنا كل يوم، إذا أردت رؤيتها فما عليك إلا أن تتجه إلى أقرب مجرى مائي، اعترضت مساره بضعة صخرات، وانظر

إلى مساره حولها. إن الاضطراب الدوامي الذى تراه حول الصخور هو حالة هيولية، ولكنها لم تجذب نظر التحليل العلمى من قبل.

حين كان العلماء مركزين على النظم الخطية بصفة أساسية، لم يكن عليهم الاهتمام بالهيولية. ولكن حين اتضح لهم أن أغلب ظواهر الطبيعة (كالطقس والتدفقات) لها طبيعة غير خطية، وأن اللاخطية تثير الهيولية، علموا أنه لا مناص من انتهاج أسلوب آخر.

لكى نرى كيف يبدو هذا الأسلوب الآخر، لنعد إلى البندول. فالبندول الحقيقي، وليس المثالي، يتصرف بصورة لاخطية. لنرسم مرة أخرى فضاء الطور له، ولكنا هذه المرة لن تهتم بالحفاظ على السعة صغيرة، بل إننا فى الواقع سنتعمد أن تكون كبيرة.

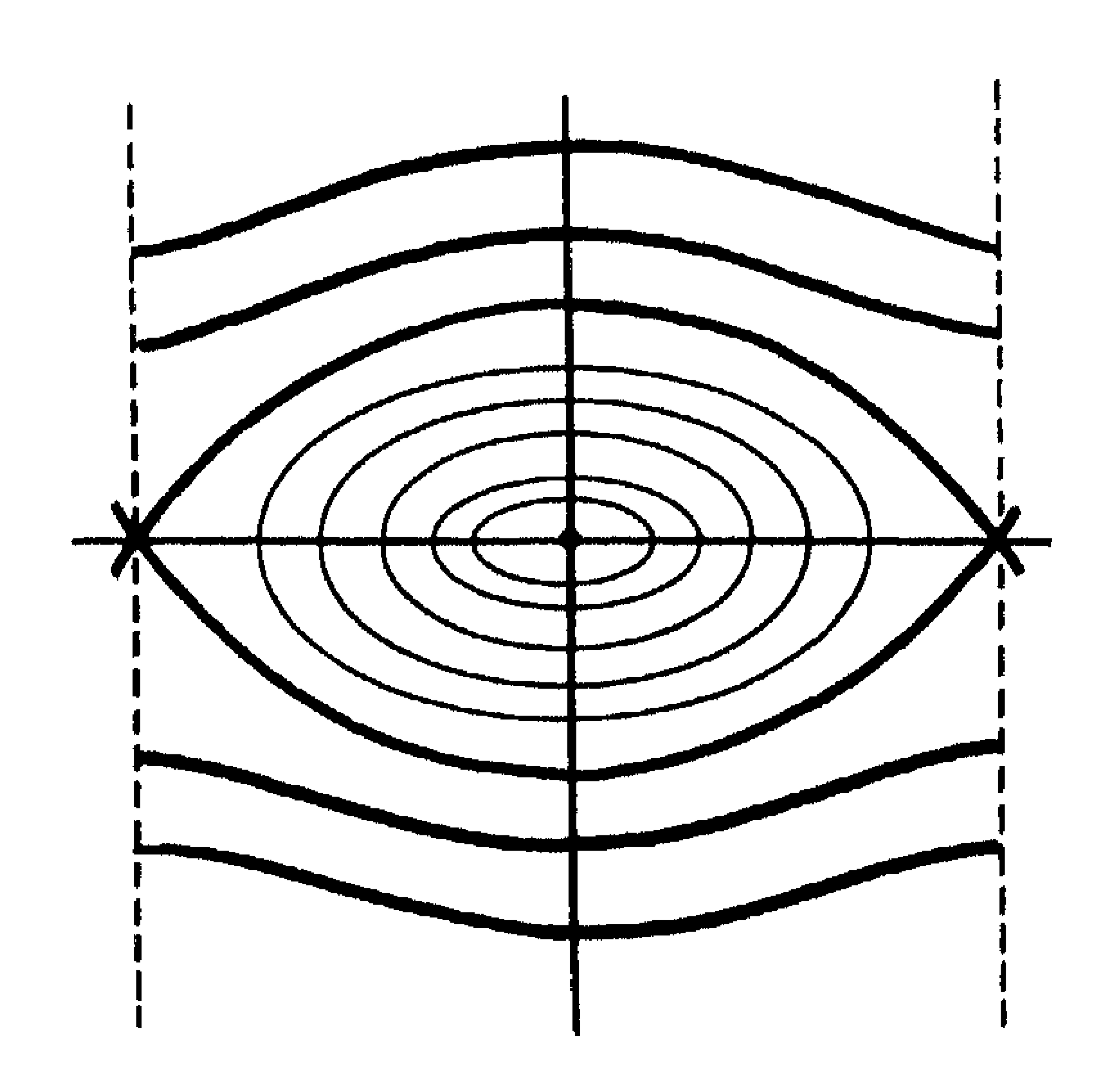
إننا حين نكرر ما فعلنا فى المرة السابقة، نحصل بدلا من الدائرة على أشكال إهليلجية (بيضاوية) حول نقطة مركزية. وكلما زادت السعة حصلنا على إهليلجات أكبر وأكبر. فى هذه المرة لنجعل الثقل فى أقصى ارتفاع له (نفترض في ذلك صلابة ذراع البندول). إننا حين نطلقه من هذا الموضع نرى أنه يدور لفة كاملة ويصل إلى نفس الموضع من الناحية الأخرى. سوف يكون شكل فضاء الطور على الصورة التالية.



المصور الطورى للبندول اللاخطى

كافة المسارات لسعات مختلفة فى فضاء الطور

هل لنا أن نمضى أكثر من ذلك؟ إننا لا ننظر للبندول على أنه يدور ويدور، ولكننا حين نفعل ذلك، ويكون البندول فى ذلك أشبه بالمقلاع الذى يدار عدة دورات قبل إرساله، إننا عندئذ نرى أن المسارات لم تعد مقفلة، فهى إذن ليست مدارات مغلقة كما ألفناها. بل إننا نجد فى هذه الحالة نوعين من المسارات، بعضها مع عقارب الساعة والبعض الآخر ضد عقارب الساعة، وبإضافة هذه المسارات للشكل السابق نحصل على الشكل التالي:



توسع فى الشكل السابق ليشمل المسارات التى يدور فيها البندول دورات كاملة

تلاحظ أنه فى هذا الشكل يوجد مساران متقاطعان يشار لهما باسم "الفواصل" separatrices لكونهما يفصلان بين نوعى حركة الجسم، فما كان بداخلهما من مسارات مغلقة تعبر عن الحركة الترددية، وما كان خارجهما من مسارات مفتوحة تعبر عن الحركة الدائرية سواء فى اتجاه أو عكس اتجاه عقارب الساعة.

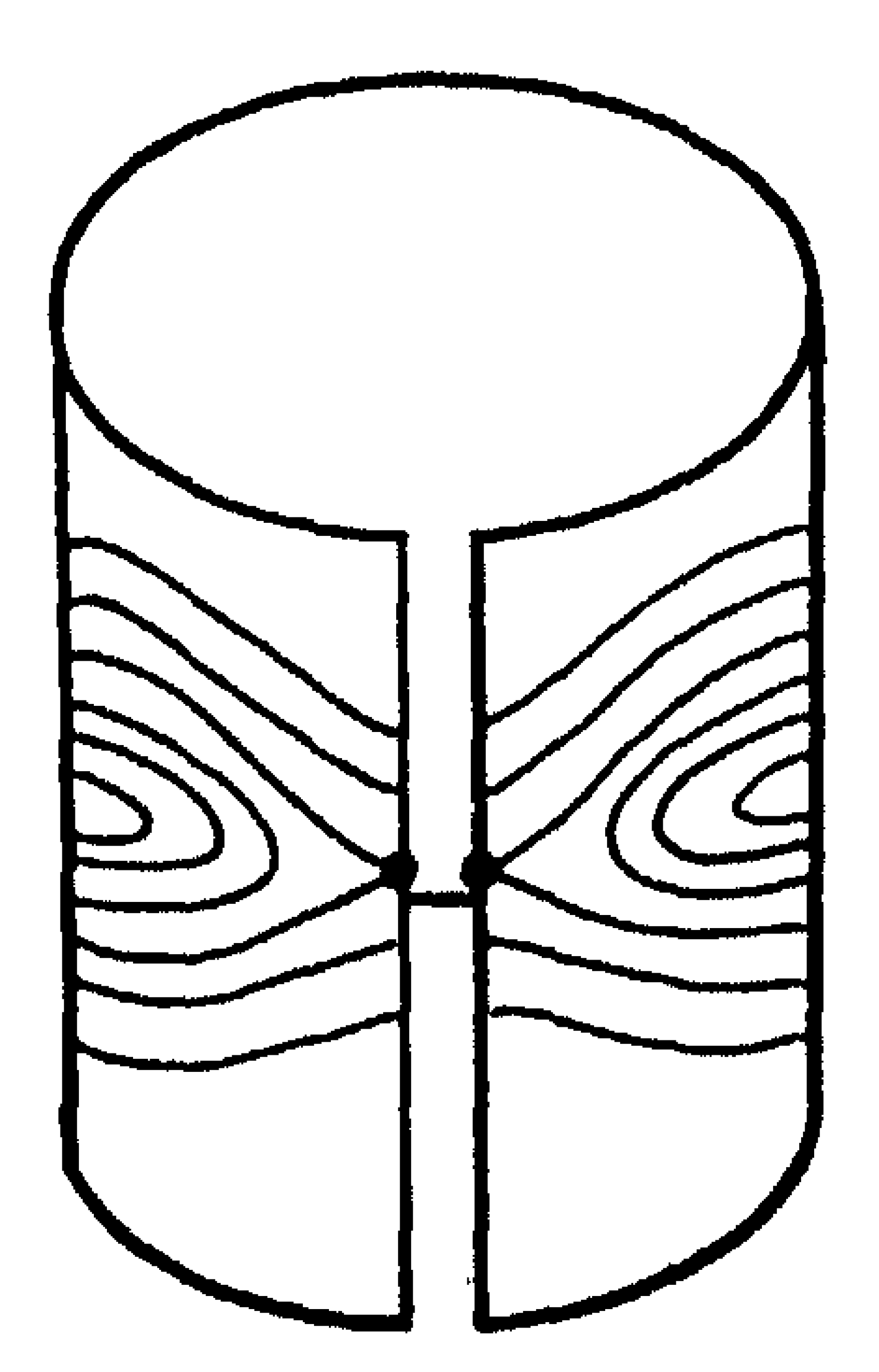
وقد يأخذ المرء انطباعا من التحليل السابق بأننا نعامل البندول على أنه غير مثالى لأننا قد تناولناه من ناحية عدم الخطية، ولكن الواقع أن التحليل لا يزال متعلقا ببندول مثالي. فالحالة الواقعية تقتضى أن ندخل عملية "الإخماد" الناتج عن الاحتكاك فى

الصورة. فلكي يظل البندول فى تأرجحه يلزم له مصدر خارجي يعطيه دفعات تعويضية عن فقد الطاقة نتيجة الاحتكاك، كما فعل هايجنز. يشار إلى نظام كهذا بالنظام القسري، وتكون هيئة فضاء الطور للحركة القسرية مشابهة للشكل السابق.

لى فضاء الطور

لنعد إلى شكل فضاء الطور السابق، كما بينا سابقا فإن الفواصل تفصل بين نوعين من الحركة. لنأخذ نقطتي تلاقى المنحنيين، واحدة لليمين والأخرى لليسار. إنهما يعبران واقعيا عن موضع البندول فى أقصى ارتفاع له، النقطة اليسرى تعبر عن حركة البندول آتيا من اليسار إلى أن يصل ذلك الموضع، والنقطة إلى اليمين تعبر حالة الوصول إليه من اليمين.

النقطة الجوهرية هنا أن النقطتين تعبران عن ذات الموضع (الثقل فى نفس المكان)، ومع ذلك فإنهما على الشكل متباعدتان تماما. كيف لنا أن نعدل من هذا العيب الظاهري؟ أبسط طريقة للوصول لذلك هى أن نلف فضاء الطور على سطح اسطوانة إلى أن تنطبق النقطة اليمنى على اليسرى. إن هذا سيعطينا انطباعا فوريا بأنهما نقطة واحدة.



لى فضاء الطور
المصور السابق مرسوم على سطح اسطوانة
أبعاد أكثر

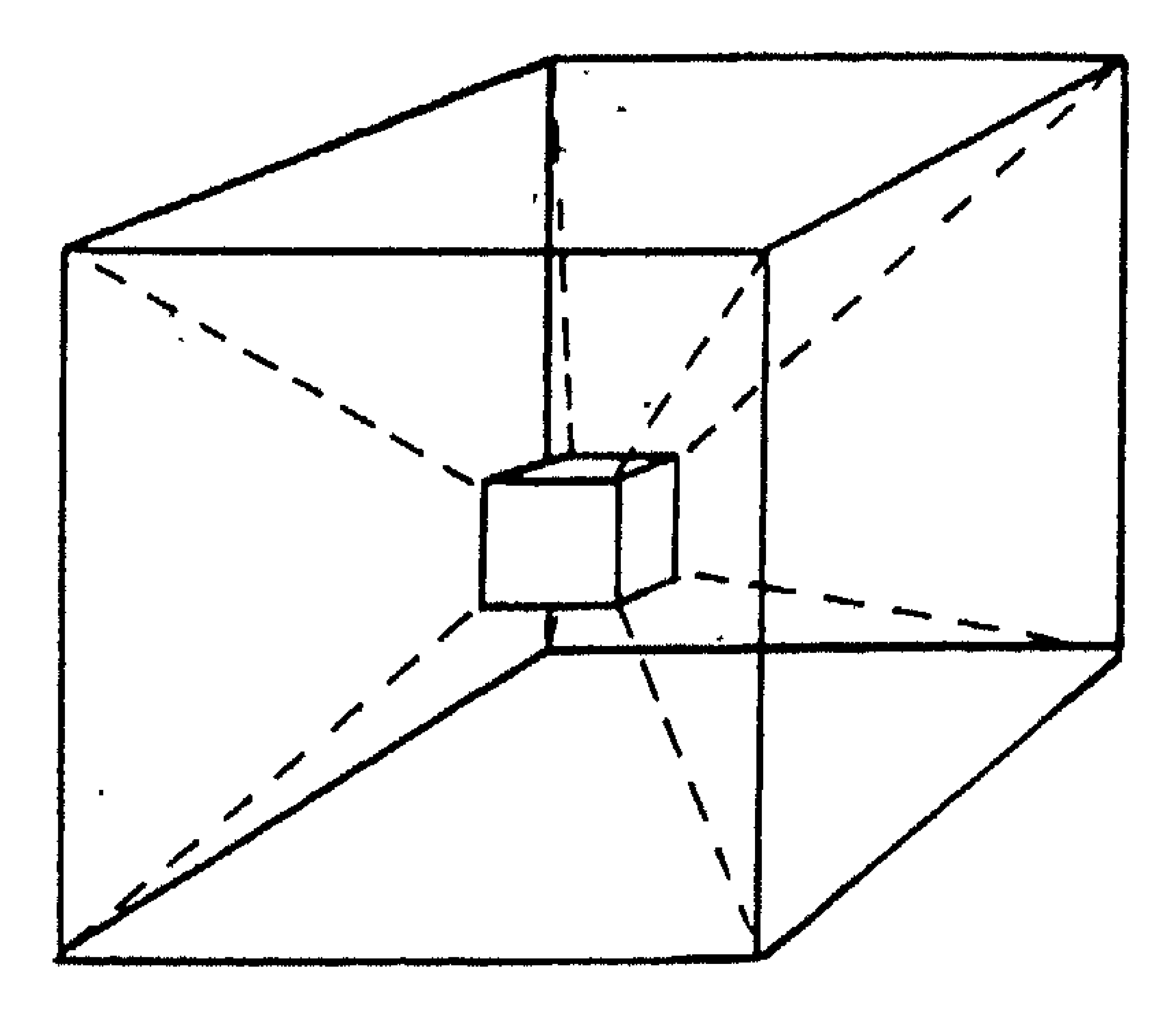
كان اختيارنا لمثال البندول لشرح فضاء الطور لكونه مثالا بسيطا. فهو لا يحتوى إلا على بعدين لوصف حالته، فيكون رسم فضاء الطور على صفحة ورق أمرا متيسرا. إلا أن وجه القوة فى استخدام فضاء الطور تتمثل حين يكون للنظام أكثر تعقيدا. وليس مطلوبا أن يكون النظام أبعاد كثيرة ليكون معقدا، فقد رأينا أن نظاما ثلاثيا هو معقد بما فيه الكفاية.

ماذا نفعل إذا كان لدينا عدة أجسام فى نظام واحد؟ يتطلب الحل الكامل الأخذ فى الاعتبار وصف كل جسم من حيث السرعة والموضع. فإذا كان لدينا ثلاثة أجرام وكل جرم منها يوصف موضعه بثلاثة أبعاد، فإن فضاء الطور سيكون له ١٨ بعدا.

لا تمثل الأبعاد المتعددة مشكلة لدى الرياضيين. فالرياضيون يتعاملون معها منذ أمد بعيد، فأينشتاين مثلا قد استخدم أربعة أبعاد لوصف الزمكان فى نظرية النسبية. على أن تصور أكثر من ثلاثة أبعاد أمر صعب للغاية، إن لم يكن مستحيلا. ولكن يمكننا أن نحاول.

إذا بدأنا بنقطة، وهى لا أبعاد لها (عدد الأبعاد صفر) يمكننا أن نخلق فضاء ذا بعد واحد بتحريكها يمنة أو يسرة. إن فضاءنا ذا البعد الواحد هو فى الواقع خط مستقيم. فإذا ما تصورنا أن الخط قد تحرك عموديا على اتجاهه، نكون قد خلقنا فضاء ذا بعدين، يملأ صفحة من الصفحات. لنتخيل الآن أن هذه الصفحة قد تحركت عموديا على مسطحها، نكون قد خلقنا فضاء ذا ثلاثة أبعاد.

كيف لنا أن نتحرك لخلق أربعة أبعاد. من الواضح أننا يجب أن نحرك الفضاء ذا الفضاء الثلاثة متعامدا على نفسه، ومن الصعب تخيل كيف نفعل ذلك بالضبط. ربما نتصور تمدده فى كافة الاتجاهات كما فى الشكل التالى:

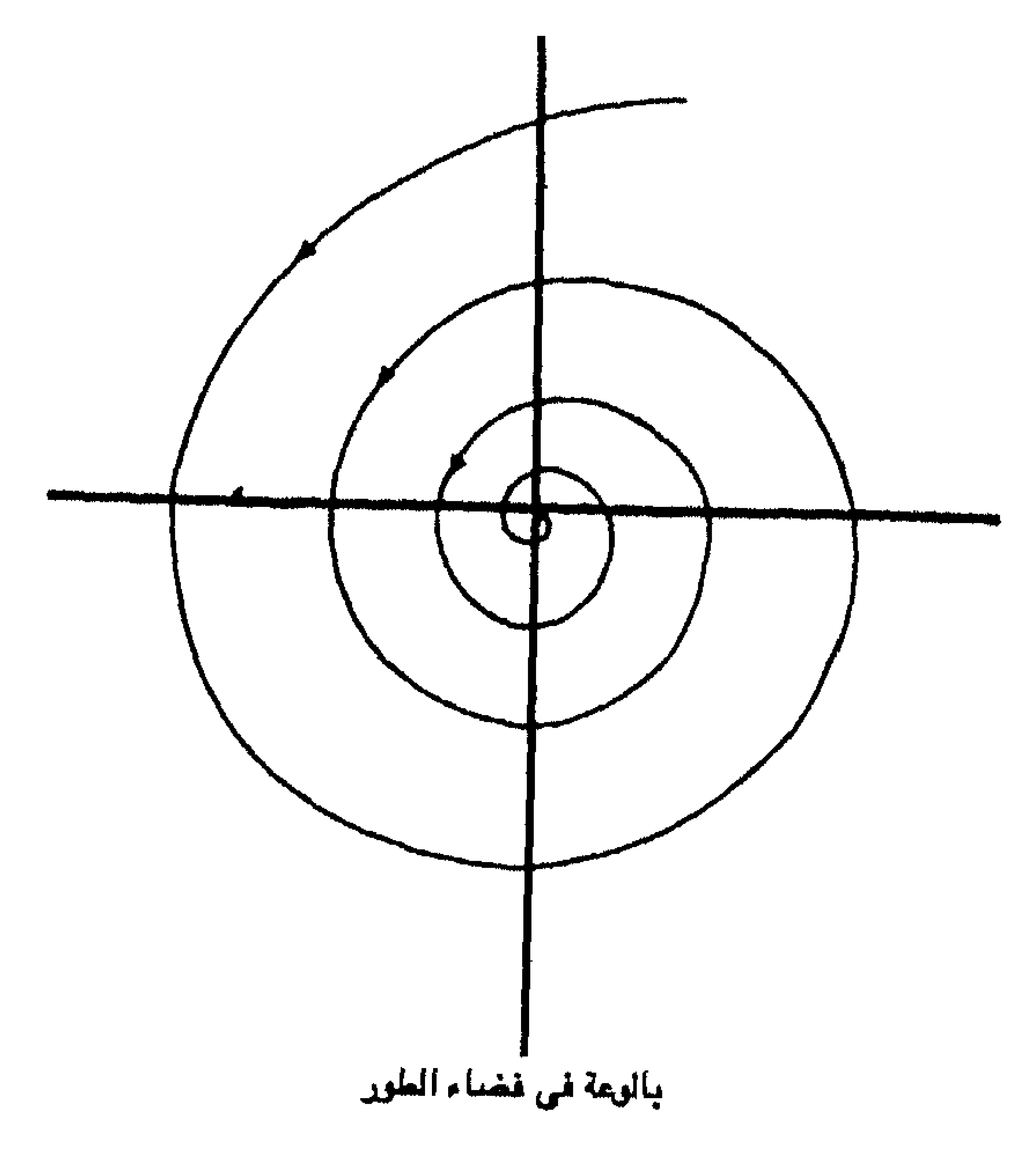


تمثيل مبسط لفضاء رباعى الأبعاد

ولأبعاد أكثر من ذلك يزداد الأمر صعوبة، ولكن لحسن الحظ لسنا مضطرين لذلك. إن وصف الأبعاد رياضيا مهما كان عددها أمر معتاد فى الرياضيات، والتعامل معها بهذه الصورة لا يمثل أية صعوبة.

البالوعة والمنبع

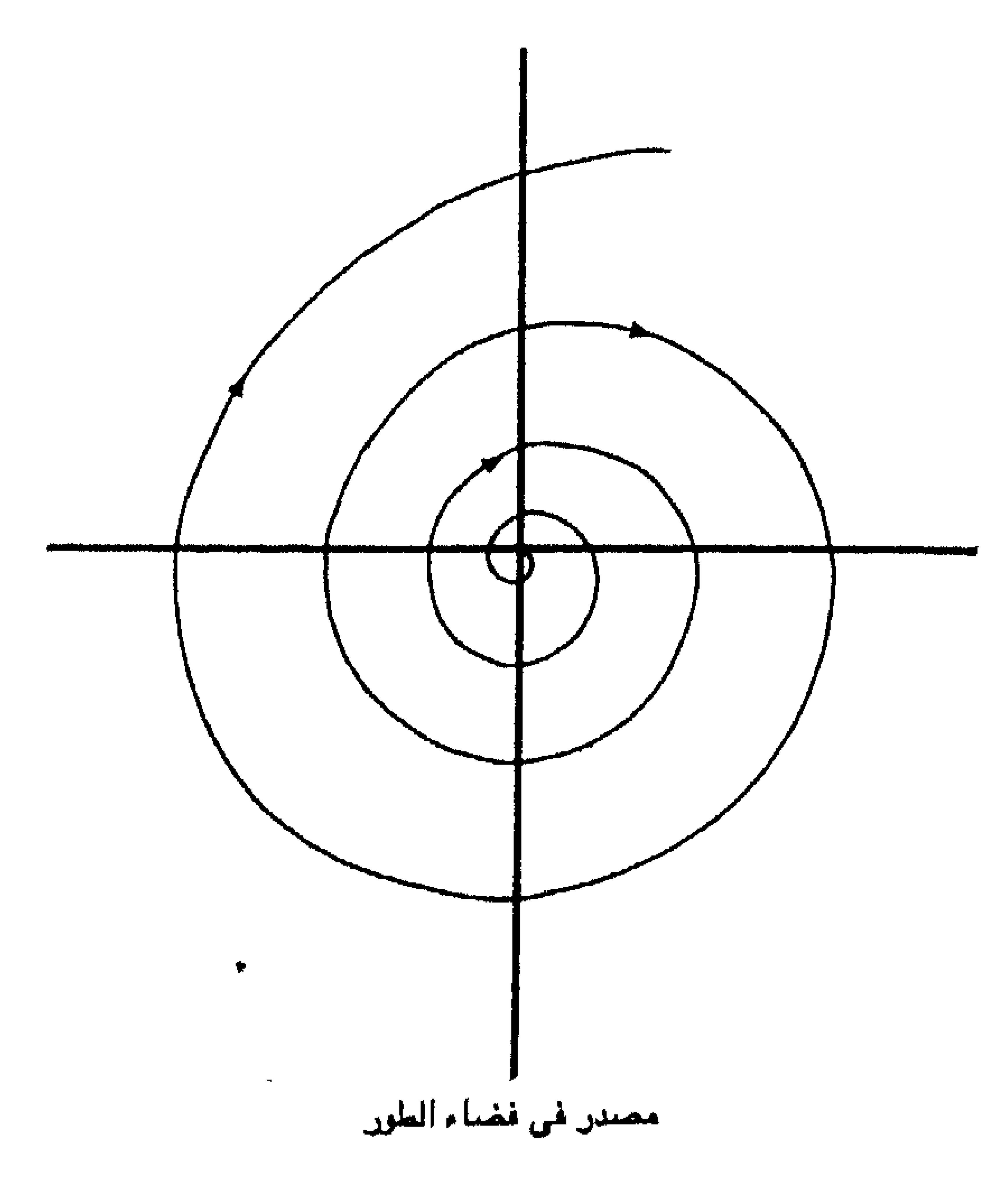
تتعقد هيئات فضاء الطور للنظم المعقدة، وقد سبق لنا أن رأينا بعضا من الخصائص التى يمكن أن تحدث، لنعد إلى البندول المخمد، سوف نحصل على شكل كالتالى.



بالوعة فى فضاء الطور

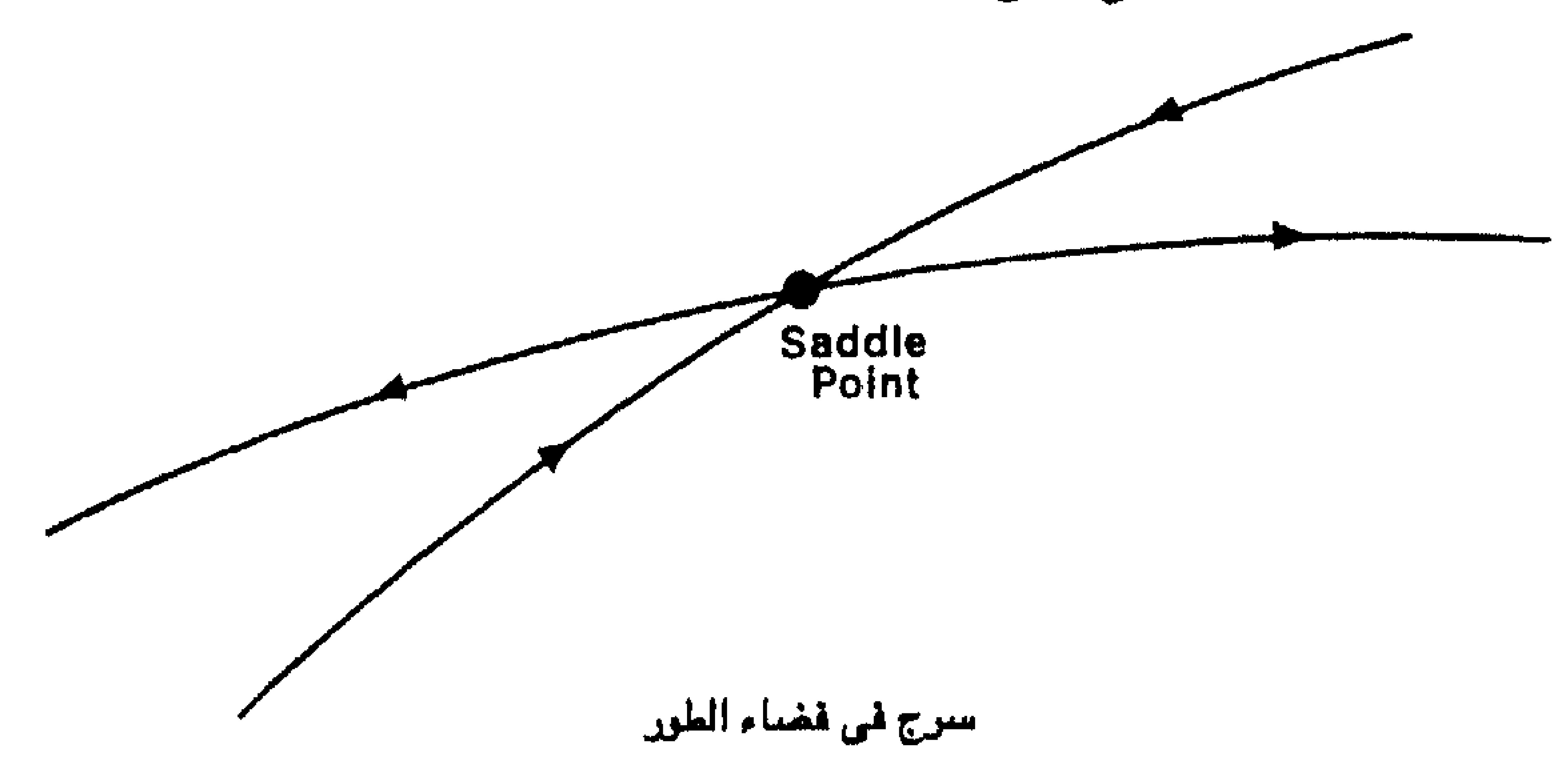
سيكون الشكل ببساطة لولبيا. لو أننا تصورنا تدفقا مائيا، فهو يذكرك بدوامات الماء وهو ينساب فى بالوعة. لهذا السبب نطلق على هذا الشكل "بالوعة" Sink. ولا يشترط للمنحنى المؤدى للبالوعة أن يكون على صورة لولبية، بل يمكن أن يكون على أية صورة، كأن يكون خطوطا مباشرة، أو على صور أخرى متعددة. ومن المهم أن نبين أن البالوعة تمثل نظاما مستقرا، معنى ذلك أن النظام لو زحزح بدرجة طفيفة فإنه سيعود لوضعه الأصلى وضع السكون

من الممكن أيضا أن يكون التدفق (اتجاه منحنى فضاء الطور) فى الاتجاه المضاد، فى هذه الحالة يطلق على الشكل "مصدر" Source 2، وأيضا لا يشترط أن يكون لولبيا، بل يمكن أن يتخذ العديد من المسارات، وهو على عكس البالوعات، ليس مستقرا، إذا زحزح بدرجة طفيفة عن موضعه فإن وضعه يتغير بصورة كبيرة.



مصدر فى فضاء الطور

وإذا ما نظرنا مرة أخرى لفضاء الطور للبندول اللاخطى يمكنك أن ترى ظاهرة أخرى؛ هما الخطان المتقاطعان. وكما ذكرنا فإن تقاطعهما يعبر عن الموضع الأقصى علوا للثقل، ونحن نطلق على هذه اسم "السرج" Saddle، وعلى المركز "نقطة السرج". وفى شكلنا هذا يحدث السرج على طول الفواصل.



سرج فى فضاء الطور

علينا أن نتذكر إذن أن المسارات المتجهة للداخل تعبر عن حالات استقرار، والمتجهة للخارج تعبر عن حالات عدم استقرار.

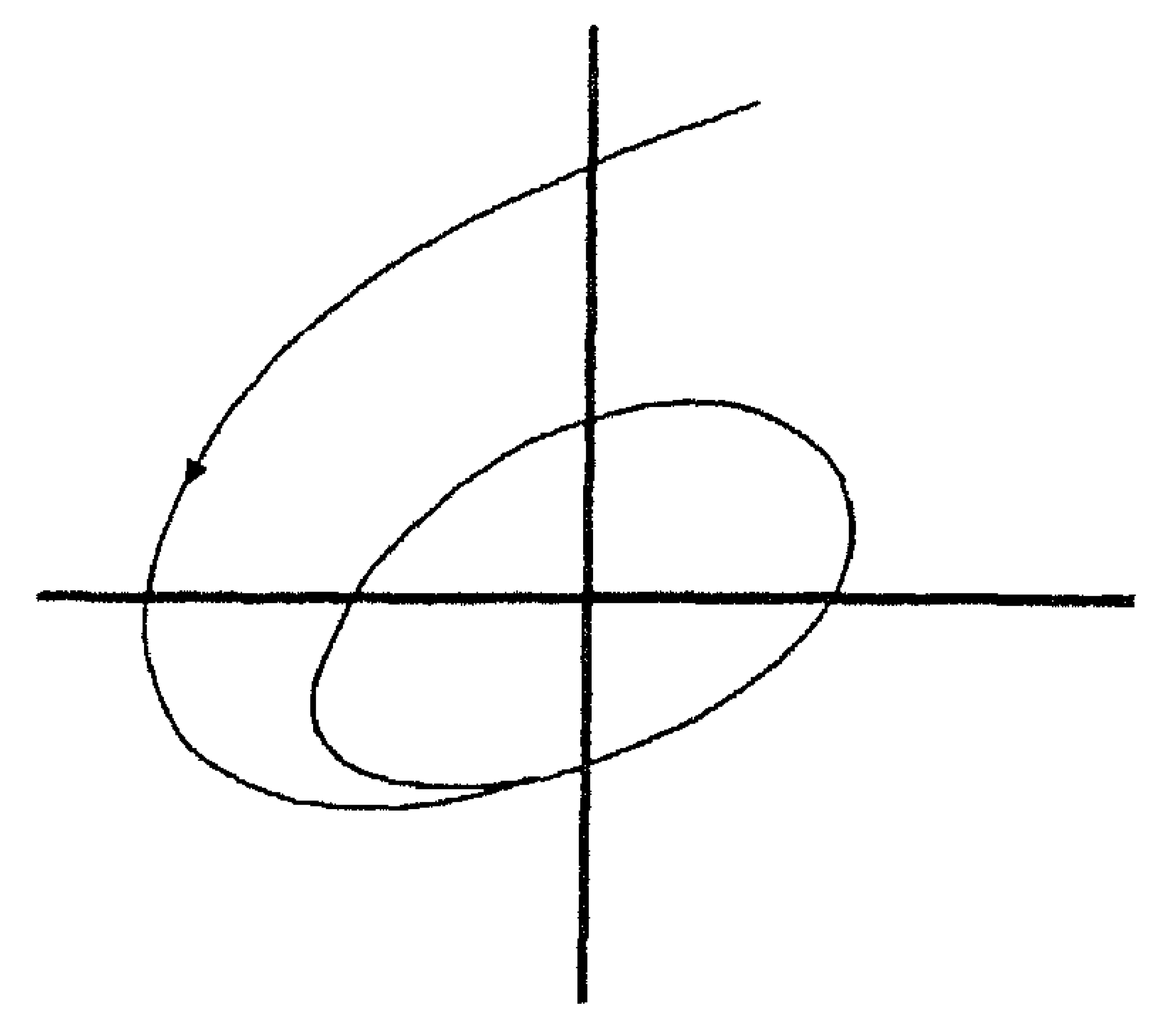
الجاذبات

فى حالة البالوعات رأينا أن الخطوط تتجه جميعها إلى نقطة، يعنى ذلك بالنسبة للبندول أن سعة التردد تقل تدريجيا إلى أن يتوقف عن الحركة. إن نظرة معينة لهذا توحى بأن الثقل ينجذب إلى نقطة معينة يتوقف عندها، ونطلق على هذا "جاذب ذو نقطة ثابتة".

والجاذبات ذات النقاط الثابتة يمكن تمييزها بسهولة، فهى مرتبطة بالبالوعات. ويمكن أن تصادف فى بعض الأشكال جاذبا أو جاذبين من هذا النوع، كما يمكن ألا تصادف شيئا من هذا القبيل.

ولكن ماذا عن الأنواع الأخرى من الجاذبات؟ تتطلب الإجابة عن هذا السؤال الرجوع للبندول القسري، أو بقول أكثر عمومية، المذبذب القسري. لقد تصادف أن يكون أفضل مثال لذلك هو القلب، فقد قام الفيزيائى الدانيماركى بالتهازار فان در بول Balthasar van der Pol فى العشرينات بدراسة النظام الرياضى للقلب حين اكتشف جاذبا آخر، ثم وجد شبيها له فى الصمامات الإلكترونية أيضا.

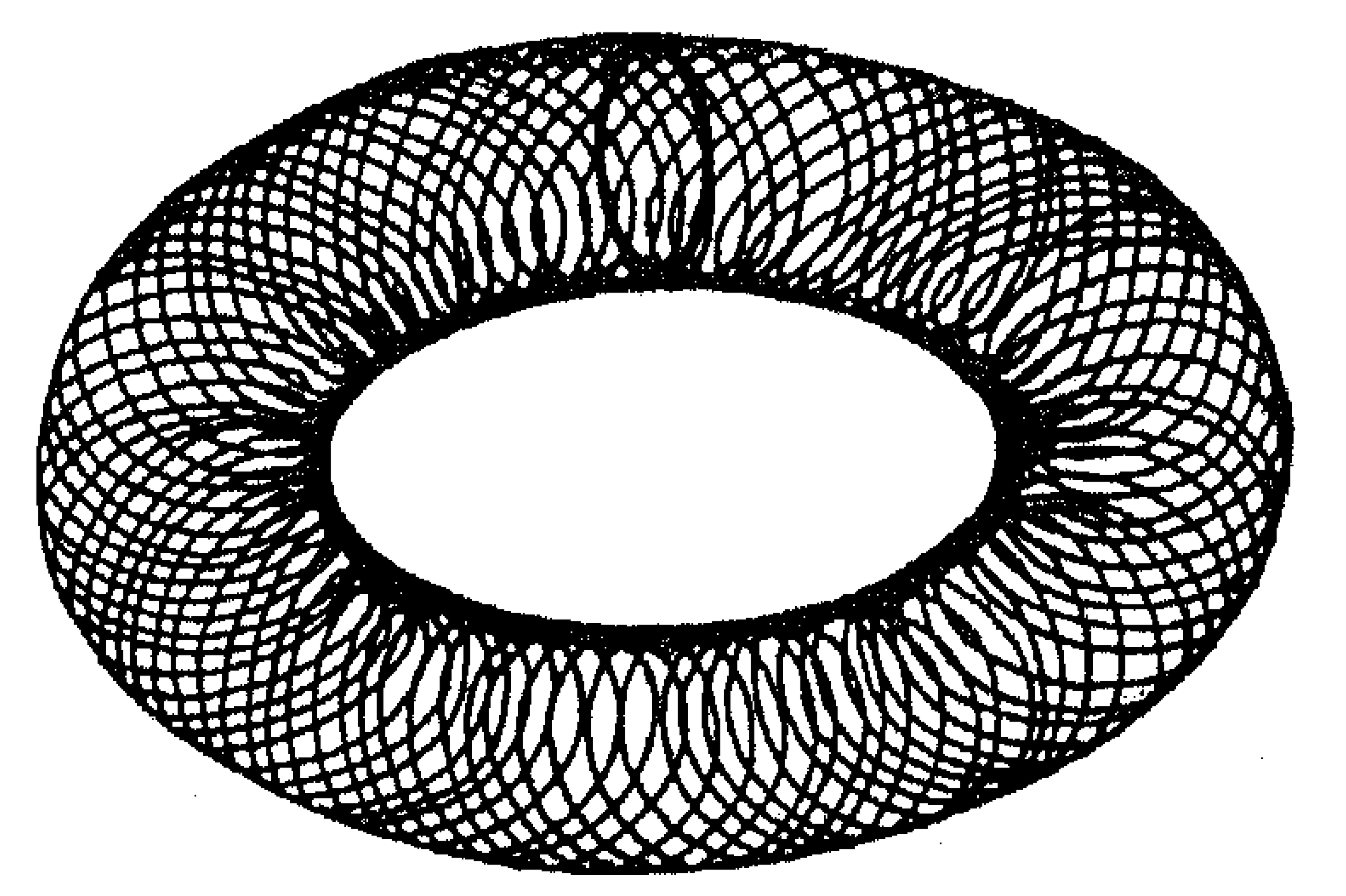
يسمى الجاذب الجديد "ذو الدورة المحدودة" limit cycle، ويمكننا أن نمثله بساعات الحوائط البندولية العتيقة التى درجنا على رؤيتها فى منازل الأجداد. مثل هذا الجاذب لا يشترط أن يكون دائريا، بل يكفى أن يكون منحنى مغلقا بأى شكل. فلو أنك جذبت البندول بدرجة أكبر فإنه سيظل متذبذبا فى دورته المعتادة. ويبين الشكل التالى هذا الجاذب.



جاذب ذو دورة محدودة

إن الشكل الإهليلجى يمثل فى الواقع البندول القسري، فلو أن الحالة الابتدائية خارجه فإن النظام سوف ينجذب إليه كما هو مبين بالشكل. وأيضا لو أن الحالة الابتدائية داخل الشكل الإهليلجى فسوف ينجذب النظام إليه. وعلى ذلك فإن لدينا جاذبا آخر، ذا الدورة المحدودة، مرتبط بالنظم الدورية.

هل هناك نوع آخر من الجاذبات؟ نعم، لو أننا أضفنا جاذبين من النوع المذكور، أى جاذبين ذَوَيْ دورة محدودة، فكيف يكون شكله؟ إن شيئا من الخيال يبين لك أنه سوف يكون على شكل الطارة Torux، أو بقول آخر مسطحا يشبه إطار عجلات السيارة، حيث تمثل دورة كبرى بمحيط الإطار، ودورة صغرى بمحيط المقطع المتعامد عليه.



جاذب على شكل الطارة

يمثل الحركة شبه الدورية

إن المثير فى جاذب شكل الطارة هذا أنه مرتبط بحركة شبه دورية، فحيث إن لدينا دورتين محدودتين فى هذه الحالة، فإننا نحصل على زمنين دوريين، الأكثر من ذلك، إذا كانت النسبة بين الزمنين عددا صحيحا، فإن النظام بأكمله يكون دوريا، وإلا كان شبه دوري. إنها حركة لا تكرر نفسها بطريقة منتظمة، ومع ذلك فهى تكرارية ويمكن التنبؤ بها.

ليس فى الجاذبات التى تحدثنا عنها ما يعبر عن الهيولية. ولكننا سوف نرى فى الفصل القادم أن جاذبا يمكنه أن يعبر عن ذلك.

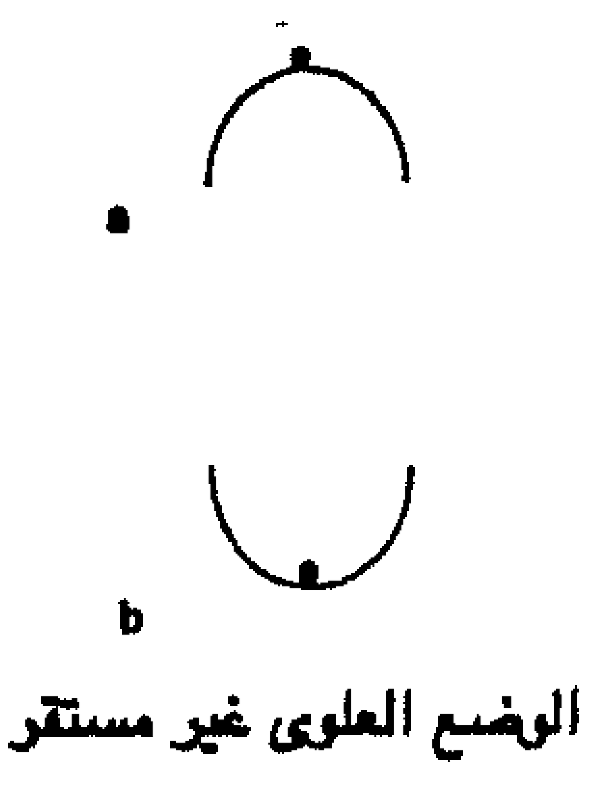
ويمكن لنظام ما أن يحتوى على أكثر من جاذب فى فضاء طوره، وقد تكون الجاذبات من نفس النوع أو من أنواع مختلفة. من أمثلة ذلك بندول الساعات العتيقة، إذا جذبته قليلا تذبذب شيئا ما إلى أن يتوقف، وإذا جذبته بالقدر الكافى بدأ التأرجح. ففى الحالة الأولى يمثل بجاذب ذى نقطة ثابتة، وفى الثانية يمثل بجاذب ذى دورة محدودة. ويشار إلى النقاط المحيطة بكل جاذب بأنها حوض الجاذب.

التفرع الثنائى

سوف نتحدث كثيرا عن التفرع الثنائى فيما بعد، ولكن موضعنا هذا يعتبر ملائما تماما لمقدمة عنه. أننا هنا لن نوقع مسارات الحركة فى فضاء الطور، بل سنبحث استقرار النظام. إن هذا الاستقرار يعتمد على بعض المعاملات فى النظام (السعة مثلا) وعلى ذلك فسوف نرسم شكلا بيانيا تكون المعاملات هى إحداثياته.

فى حدود مدى معين تجد أن النظام مستقر، وفى مدى آخر تجده عكس ذلك. فبالنظر للشكل التالى تجد أن كرة فى الوضع الأعلى غير مستقرة، حيث إن أية حركة

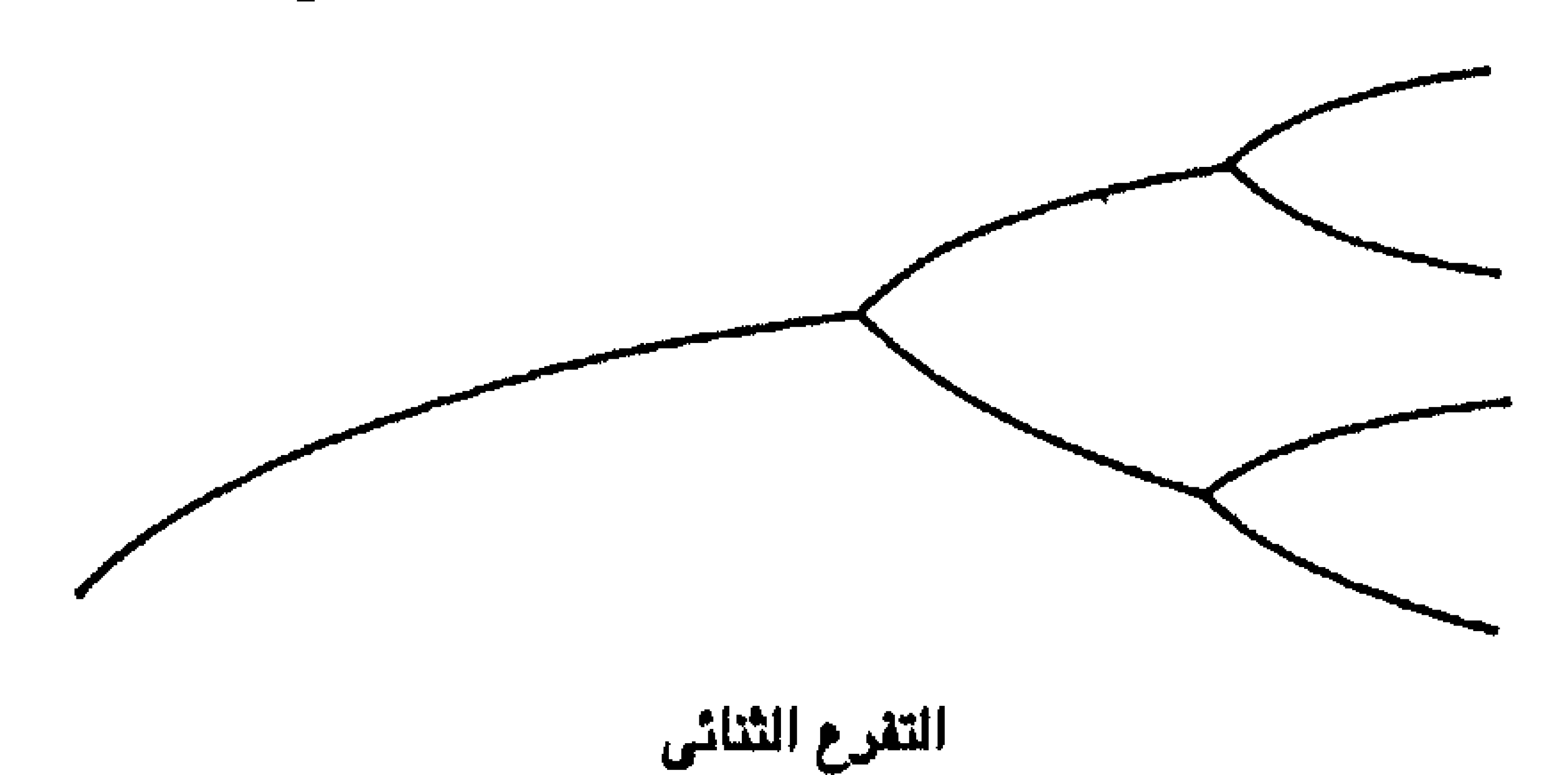
لها تؤدى إلى سقوطها، وفى الوضع الأسفل مستقرة، فعند إزاحتها عن موضعها تتأرجح مدة ثم تعود لموضعها الأصلى.



الوضع العلوى غير مستقر

والوضع السفلى مستقر

إن أحد صور التفرع الثنائى تحدث حين يتحول النظام من حالة الاستقرار إلى حالة عدم الاستقرار. وتسمى النقطة التى يحدث عندها التفرع "نقطة التفرع الثنائى".



التفرع الثنائى

وبصورة عامة، فإن إن أى تغير جذرى عند نقطة ثابتة يسمى تفرعا، فزمن الدورة مثلا يمكن أن يتغير عند نقطة التفرع، معطيا عدة حلول للمعادلة عند نفس قيمة المعامل.

بهذا نكون مستعدين للحديث عن واحد من المفاهيم الأساسية التى تميز ظاهرة الهيولية، ألا وهو الجاذب الغريب.

(١) من المهم ألا يخلط بين المصطلح الرياضي "التدفق" كتمثيل لاتجاهات منحنيات فضاء الطور، وبين المدلول الطبيعي للكلمة بمعنى التدفقات الطبيعية للمياه أو الغازات. – المترجم

(٢) تمثل النقطة التي تسمى بالبالوعة النقطة النهائية لمنحنى فضاء الطور لنظام يتأرجح بذبذبات تتناقص سعتها مع الزمن (ذبذبات مخمدة) بينما تمثل النقطة المسماة بالمصدر بداية منحنى فضاء الطور لتذبذب نظام تتزايد سعة تردده مع الزمن. – المترجم.

الفصل الخامس

الجاذب العجيب

قدمنا ثلاثة أنواع من الجاذبات فى الفصل السابق، ذى النقطة الثابتة، وذى الدورة المحدودة، والطارة. كل واحد من تلك الجاذبات مرتبط بنوع معين من الحركة، ولكل أهميته فى الدراسات الديناميكية. إن استيعاب مفهوم الجاذبات كانت خطوة ذات شأن فى هذه الدراسات، وفى فصلنا هذا سوف نتعرف على نوع آخر من الجاذبات، يسمى الجاذب العجيب، وسوف نجده يلعب دورا جوهريا فى دراسة الهيولية.

على أنه قبل أن نخوض فى هذا الموضوع، لنعد لإلقاء نظرة على النظم الديناميكية. لقد قسمها العلماء إلى نوعين، مشتتة (للطاقة) ومحافظة. فى النوع الأول تبدد الطاقة بسبب المعوقات كقوة الاحتكاك، كما رأينا فى حالة البندول. أما فى الحالة الثانية فإن الطاقة لا تبدد، وتظل المسارات على ما هى عليه ربما لمئات أو آلاف بل ولملايين من الأعوام. وتعتبر الجسيمات فى المجالات الكهرومغناطيسية والبلازما من صور النظم المحافظة.

أحد المظاهر الواضحة للنظم المشتتة هو الانكماش، ففى حالة البندول مثلا، تجد السعة تتناقص. ويحدث نفس الشيء للنظم الفلكية، ولكن على مدى أكبر من الزمن. إن تبدد الطاقة من الصغر لدرجة أنه يهمل عادة فتعامل النظم على أنها محافظة. ولكننا حين ننظر بإمعان لنظام ثنائى مثلا، نجد أن كلا النجمين يفقدان الطاقة فيتقاربان. فلو أن اهتمامنا كان منصبا على السلوك طويل المدى لنظام كهذا، علينا أن نتعامل معه كنظام تشتتي. يتطبق نفس القول على المجرات وحشودها، فعلى مدى طويل من الدهور تفقد النجوم طاقتها بسبب التصادم، وينكمش النظام. كما أن تبدد الطاقة هام فى دراسة تكون النظام الشمسي، وتكون الكون، وعلم الكونيات بوجه عام.

وتظهر الهيولية فى النظم التشتتية وغير التشتتية. ولكن هيكلها يختلف فى الحالتين. ففى النظم المحافظة لا نجد جاذبا، فالظروف الأولية يمكن أن تعطى حركة دورية، أو شبه دورية، أو هيولية، ولكن حالة الهيولية فى هذه النظم، على عكس حالة النظم التشتتية، لا تتمتع بظاهرة التماثل الذاتي. بمعنى آخر فإنه عند تكبيرها لا تعطى نسخا أصغر من ذاتها. والنظام الذى يعطى هذه الظاهرة يسمى "فراكتليا". إن مثالا للأشكال الفراكتلية هو الشواطئ. إنك لو نظرت إليها من طائرة تجد ما فيها من تجاعيد، فإذا ما اقتربت أكثر رأيته بنفس هيكله، أى مجعدا. إن الشكل الفراكتلى يظل على هيكله مهما كانت درجة التكبير.

إن مدارات النظم المحافظة ليست فراكتلية. إنها تنتشر فى كافة نقاط حيز معين من فضاء الطور، وإذا ما قمت بتكبير منطقة منه، فلن تجد تماثلا ذاتيا.

إن فتحا مبينا فى فهمنا للنظم التشتتية يتمثل فى مفهوم الجاذب العجيب، وتبدأ قصة اكتشافه بإدوارد لورنز.

لورنز والطقس

كان إدوارد لورنز محبا للطقس، حتى أنه فى صباه كان يحتفظ بيوميات عن درجة الحرارة القصوى والدنيا، وتغيرات الطقس الأخرى. كما كان أيضا مغرما بالألغاز، أو بمعنى أدق، بالألغاز الرياضية. كانت تمثل له تحديات لا يمكن أن ينكص عن مواجهتها، مهما كلفته من وقت وجهد. وانتهى به الأمر إلى قراره أن يصبح متخصصا فى الرياضيات. وقبل أن يحقق حلمه اندلعت الحرب العالمية الثانية، واستدعى للخدمة العسكرية، حيث كان المجال لاستخدام الرياضيات ضيقا إلى حد ما فى السلاح الذى وزع عليه، السلاح الجوي، بينما كانت الحاجة فيه ماسة للمتخصصين فى الطقس، وسرعان ما انخرط لورنز فى هذا العمل. لقد اكتشف بعد فترة من العمل أن الطقس لغز أعقد من كل ما واجهه من ألغاز، فهام به حبا. وبعد تسريحه قرر المضى قدما فى هذا التخصص، والتحق بكلية دارتماوث حيث حصل على درجة فى الطبيعة الجوية.

على أنه ظل فى أعماقه محتفظا بشخصية عاشق الرياضيات، واستطاع بعد عدة سنوات ربط التخصصين معا، وذلك حين عمل فى معهد التكنولوجيا بماساشوستس.

كانت المشكلة هى التنبؤ بالطقس، فعلماء الطقس يمكنهم التنبؤ به لعدة أيام، أما بعد ذلك فلا. هل ثمة من سبب لذلك؟ لماذا يكون الطقس غير قابل للتنبؤ؟ كانت الإجابة تتطلب وضع نموذج رياضى للطقس، معادلات تمثل التغير فى معاملاته من درجة حرارة ونسبة رطوبة وسرعة رياح وهلم جرا. لم تكن نمذجة الطقس بالأمر الهين. وأخيرا وضع لورنز ١٢ معادلة صاغ بها نموذجا تقريبيا. إن إجراء الحسابات على نموذج كهذا رغم تبسيطه أمر شاق، ولكن لحسن الحظ كان الحاسوب قد شق طريقه للوجود. كانت الأجهزة فى الستينات على درجة كبيرة من البدائية، ذات صمامات إلكترونية مشهورة بشدة ما تشعه من حراة وكثرة ما يعتريها من أعطال، ولكنها كانت تقدم عونا لا يقدر فى إجراء مئات الحسابات فى دقائق.

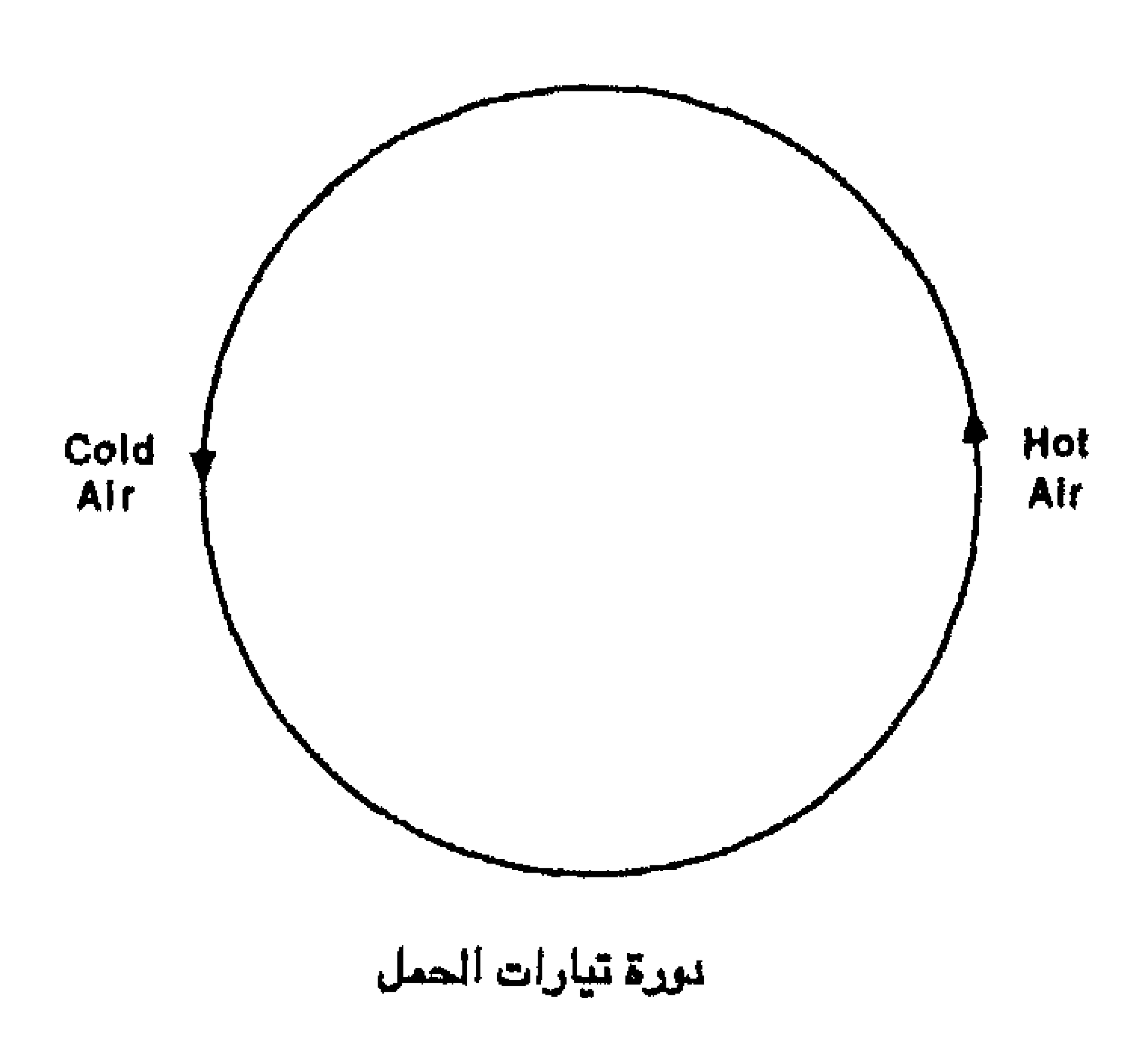
كان الطراز الذى تحت يدى لورنز هو McBee، طراز عتيق لا يقارن بما عليه أجهزة اليوم، ولكنه بالنسبة له لا غنى عنه، يجلس أمامه ينتظر فى شغف أن يخرج المئات من الأرقام التى تعبر عن أحوال طقس نموذجه التخيلي. كان جهازا يخلب اللب، يخرج طقسا يتغير على الدوام، لا يكرر نفسه على الإطلاق.



إدوارد لورنز

على أن لورنز شعر بعد حين بعدم الرضا، فهو لم يعرف شيئا بعد عن التنبؤ طويل المدى كما كان يأمل، لذا فقد بسط النموذج مركزا على تيارات الحمل كعامل مؤثر فى الطقس. إن تيارات الحمل هذه حوالينا ليل نهار، الهواء البارد يهبط إلى أسفل بينما يصعد الهواء الساخن فى السماء، ونتيجة لذلك يحدث المطر والثلج والرياح وأشياء أخرى. كانت تيارات الحمل التى صورها لورنز فى نموذجه الرياضى دائرية، يصعد الهواء على جانب من الدائرة ويهبط على الجانب الآخر.

بسط لورنز نموذجه إلى ثلاث معادلات تبدو للعيان بسيطة الحل. إن حل ثلاث معادلات آنية أمر يدرس فى المرحلة المتوسطة من التعليم، ولكن معادلات لورنز لم تكن عادية، بل معادلات تفاضلية. ولذلك فهى رغم بساطة مظهرها كانت معقدة.



دورة تيارات الحمل

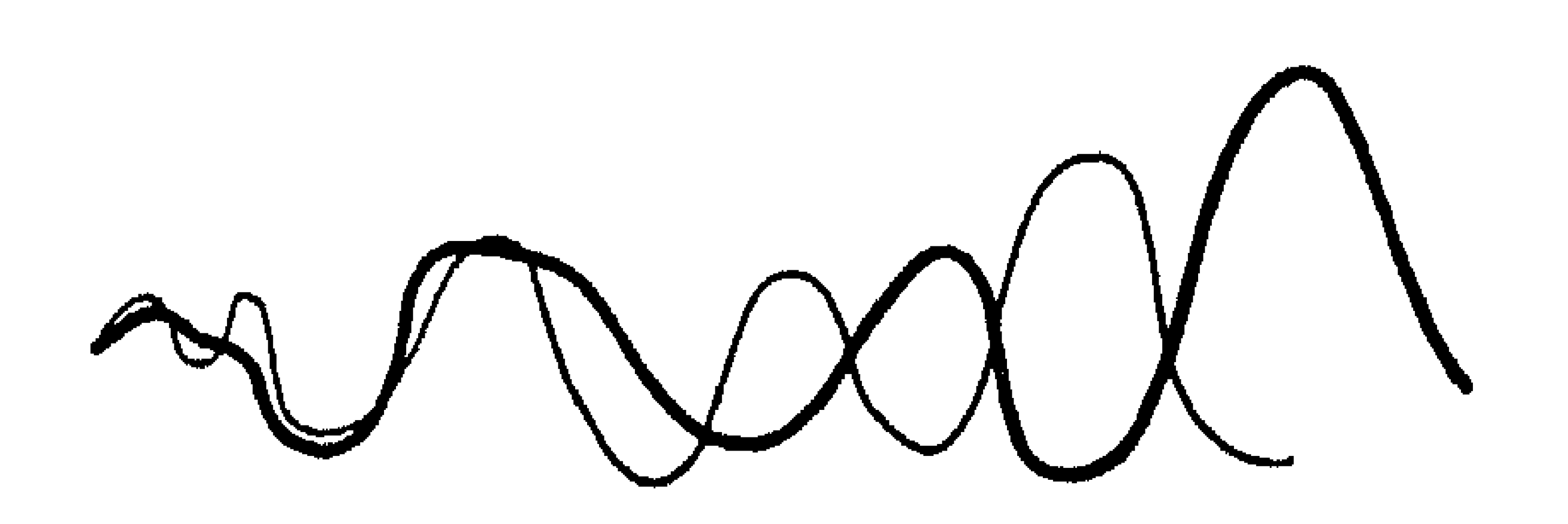
أدخل لورنز معادلاته فى الحاسوب وكرر العمل، وبدأت ملامح الطقس تظهر أرقاما متتالية كالمعتاد. ثم طور المخرجات إلى شكل بيانى أكثر وضوحا. كان هدف لورنز معرفة إمكانية التنبؤ طويل المدى، وكانت الحواسب الأكبر قدرة والأوسع ذاكرة قد بدأت فى الظهور، بينما أطلقت الأقمار الصناعية منذ عدة سنوات. إنه عصر جديد يلوح فى الأفق، بدا فيه التنبؤ لمدة تصل لشهور أمرا متاحا، وخطط لمشروع طموح لتحقيق ذلك، استعانة بتلك الحواسب الجبارة. كان حلما للكثيرين، فهل ثمة من عقبة تعترض طريقه؟ كان لورنز متأكدا من أن نموذجه لتيارات الحمل يحمل الإجابة، وربما يساعد فى تذليل أية عقبة تظهر، ولكنه كان لا يدرى الأهمية الحقيقية لنموذجه.

يوما وراء الآخر بدت الأنماط المخرجة من الحاسوب عشوائية. وذات يوم قرر أن يعيد نمطا من تلك الأنماط، فأدخل البيانات من مخرجات الدورة السابقة مؤملا أن يكرر النمط نفسه. بالفعل كان التطابق واضحا في عدة دورات في بداية الإخراج (تقابل عدة أيام في الواقع)، ثم سرعان ما بدأ التباعد. وشاهد لورنز في دهشة وخيبة أمل كيف أصبح النمطان أبعد ما يكونا عن بعضهما البعض. وأعاد الكرة إذ ربما يكون في الأمر خطأ ما، ولكنه حصل مرة أخرى على نفس النتيجة. وفكر أنه حتى ولو كان هناك خطأ طفيف في المدخلات، فإن المعروف منذ عهد نيوتن أن مثل هذا الخطأ لن يؤدي إلا إلى خطأ طفيف في النتائج.

فكر لورنز في المصدر المحتمل للخطأ، ثم تذكر أمرا ما. إن الحاسوب يخرج الأرقام بدقة ستة أرقام عشرية، ويقربها هو إلى ثلاثة، مدخلا بذلك خطأ لا يزيد عن واحد في الألف.

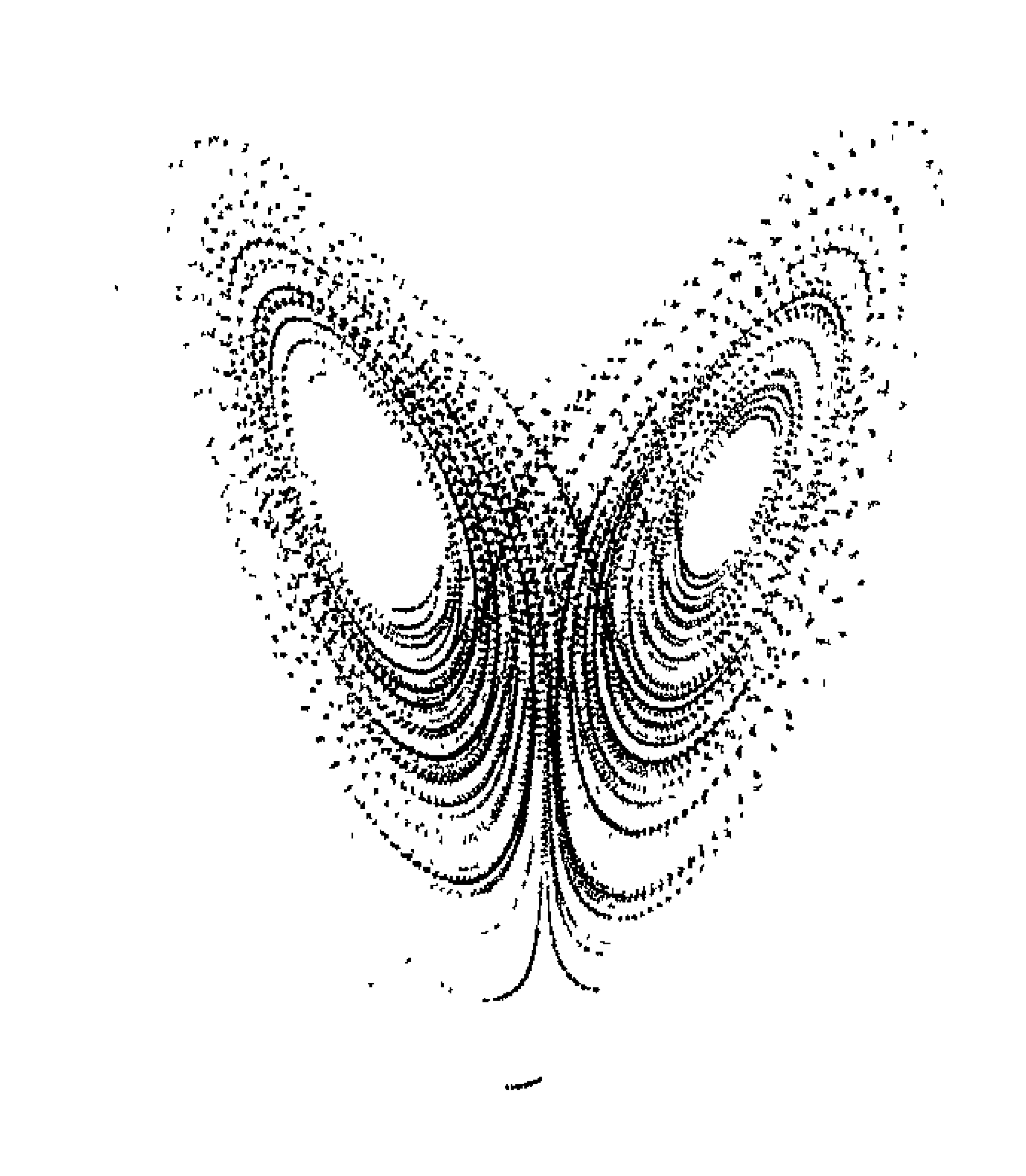
ولكن كيف يمكن لخطأ بهذه الضآلة أن يترتب عليه اختلاف بهذه الخطورة؟ أدرك لورنز أنه أمام أمر جلل. ومن جهة أخرى فإن شكل فضاء الطور كشف عن مفاجأة أخرى، لقد بدا أشبه بجناحي فراشة. لقد أخذت آلاف النقاط تتكاثف على الشاشة إلى أن انتظمت في طيتين تمثلان الجناح الأيسر وخمس طيات تعبر عن الجناح الأيمن.

تسمى هذه الظاهرة اليوم "ظاهرة الفراشة". كان واضحا أن النقاط على فضاء الطور لن تكرر نفسها أبدا، فهي تدور مع الجناح الأيمن فترة، ثم تنتقل إلى الأيسر لتظل معه برهة، وهكذا دواليك. أما متى تذهب إلى هذا الجناح أو ذاك فأمر لا يمكن التكهن به، لقد كانت حركتها عشوائية، أو بالأحرى هيولية.



الحساسية المفرطة للظروف الابتدائية

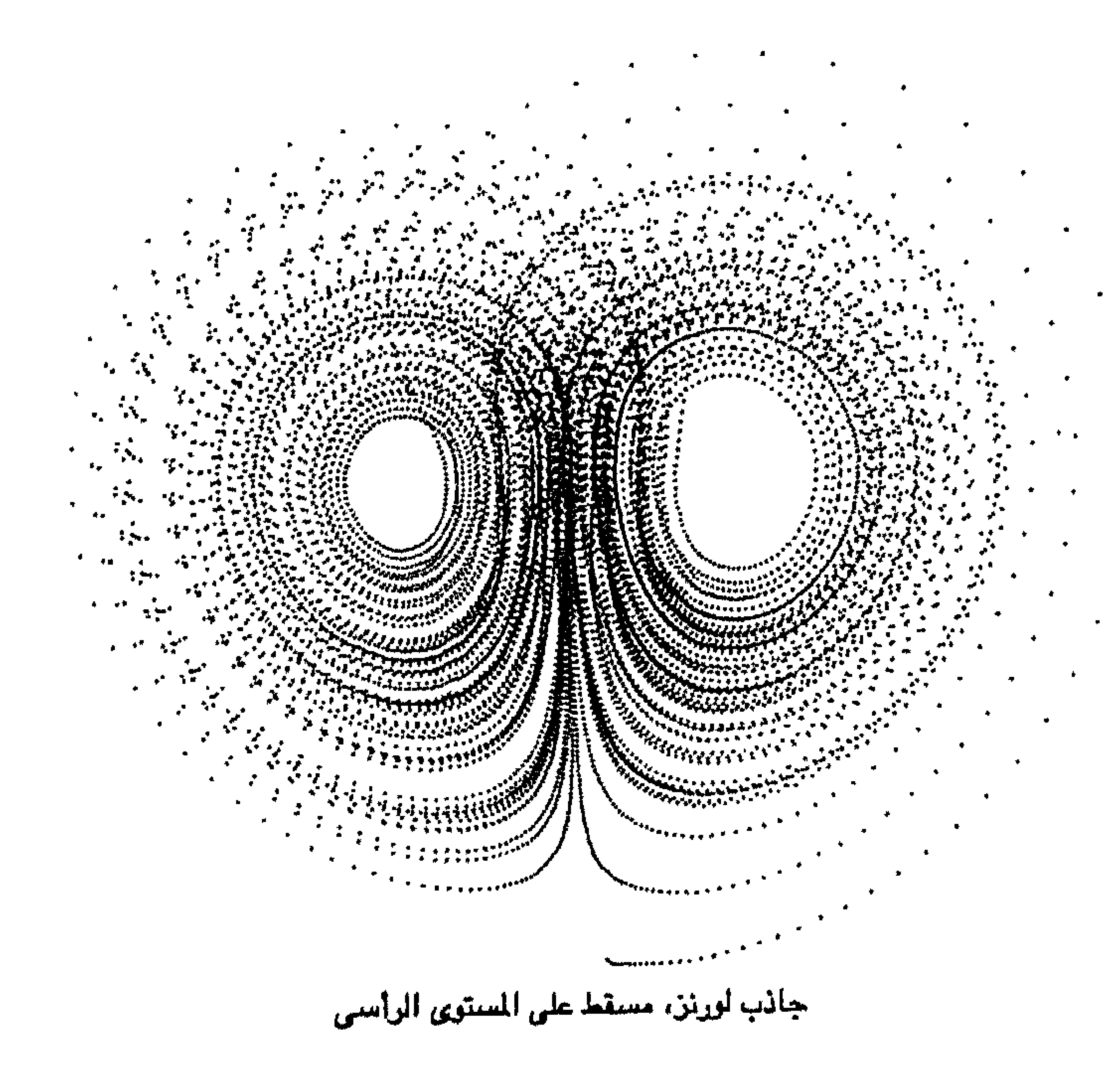
نشر لورنز بحثا عن اكتشافه فى مجلة علم الهواء الجوى Journal of Atmospheric Science، تحت عنوان "التدفق التحديدى اللادورى "Drterministic Nonperiodic Flow، ولكن لم يجذب انتباه أحد لعقد من الزمان تقريبا. أما بالنسبة للورنز فقد كان الأمر فتحا مبينا فى قضية التنبؤ بالطقس طويل المدى. إذا ما كان تغيير طفيف فى البيانات الأولية تسبب تغييرا جوهريا فى غضون بضعة أيام، فمعنى ذلك أن التنبؤ على مدى طويل أمر ميئوس منه.



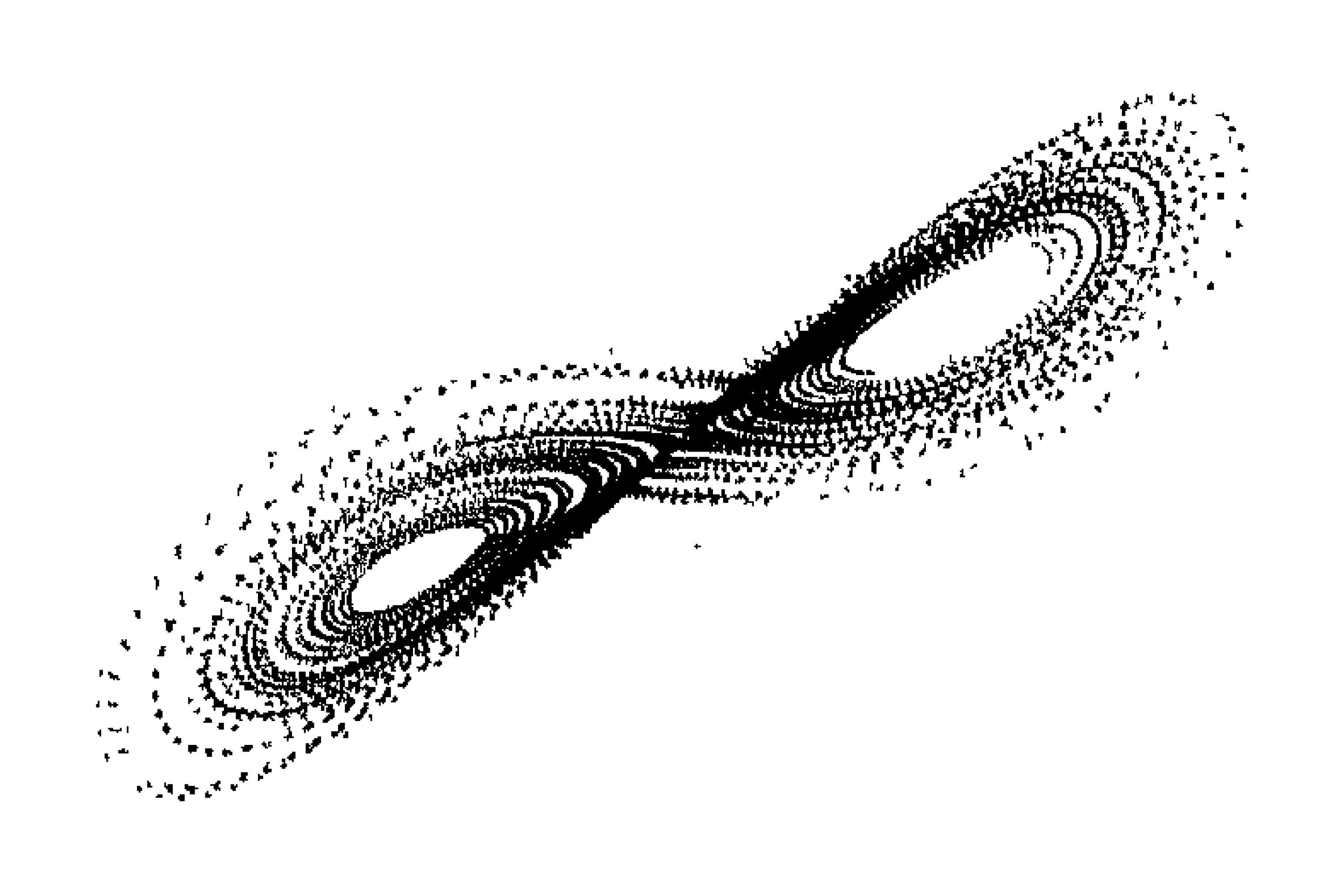
جاذب لورنز (ظاهرة الفراشة)

وجد علماء الطبيعة الجوية بحث لورنز مثيرا، ولكن ما به من رياضيات أقعدهم عن متابعته، ومن ثم فلم يحفل بالبحث أحد. لقد كان من شأن بحث كهذا أن يثير الرياضيين والفيزيائيين، ولكن أحدا منهم لا يطلع على مجلة تهتم بالهواء الجوي.

إن ما اكتشفه لورنز هو أول جاذب عجيب، الأول فى قائمة من هذا النوع من الجاذبات كشف عنها على مدى أعوام تالية، ولم يطلق عليها ذلك الاسم إلا بعد حين من الزمن.



جاذب لورنز، مسقط على المستوى الرأسى



جاذب لورنز، مسقط على المستوى الأفقى

واتضح أن الطقس ما هو إلا مجال واحد تبدو فيه حالة الهيولية. فكما قدمت سابقا يمكنك أن تراها فى أى يوم من أيام العام حين تفتح الصنبور. فحين يكون تدفق

الماء بطيئا يبدو سلسا صافيا، أما عندما يعطى سرعة أعلى يتغير تغيرا جذريا، إذ يضطرب فى سريانه، والتدفق المضطرب هو حالة هيولية بلا أدنى شك. وكما سنرى فإن نظرية عن الاضطراب كانت قد وضعت قبل أن يبدأ لورنز نشاطه بسنوات.

لنداو ونظرية الاضطرابات

قبل أن تنتشر ظاهرة الاضطرابات فى مجال البحث العلمى فى أرجاء العالم بسنوات، كان العلماء الروس سباقين إلى ذلك. ففى وقت مبكر يعود للثلاثينات وضع أندريه كولموجروف Andrei Kolmogorov نظرية عن تلك الظاهرة. لقد اقترح أن الاضطرابات تنتج من دوامات داخل دوامات، متصاغرة أكثر وأكثر.

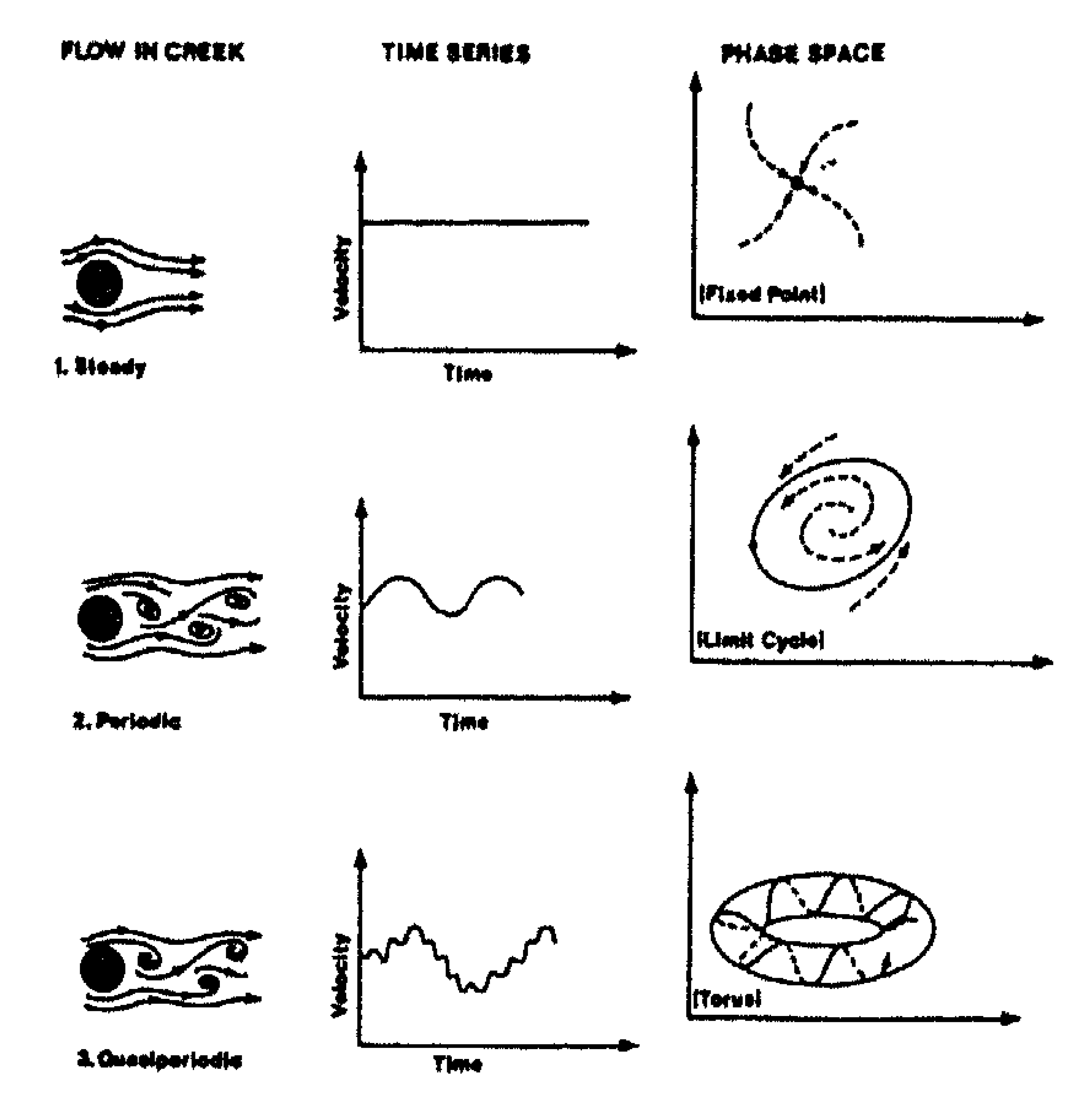
ودرس ليف لنداو Lev Landau، أيضا من الاتحاد السوفيتي، نظرية كولموجوروف ووجدها غير مكتملة. فهى لم تذكر شيئا عن بدء الاضطراب ذاته، وهو فى رأى لنداو الجانب الجوهرى فى القضية.

ولد لنداو عام ١٩٠٨ لوالد مهندس وأم طبيبة، ودرس فى جامعة باكو ثم فى جامعة لينينجراد حيث تخرج عام ١٩٢٧ ثم ارتحل إلى أوربا يتجول خلالها للدراسة، إلى أن حصل على الدكتوراه عام ١٩٣٤ من جامعة خاركوف.

كانت أغلب أعمال لنداو عن المغناطيسية وفى فيزياء الحرارة المنخفضة التى منح عنها جائزة نوبل عام ١٩٦٢، وقد كتب مع إ. م. ليفشتس سلسة كتب تعليمية غطت كافة فروع الفيزياء، منها كتاب عن ميكانيكا الموائع.

وفى عام ١٩٦٢ تعرض لحادثة سيارة كاد أن يفقد فيها حياته، ولكنه نجا بكسور خطيرة فى الرأس ومناطق أخرى، وظل بين الحياة والموت عدة شهور، وطريح الفراش لعامين، ولم يستعد بعد ذلك حالته الصحية إلى أن توفى بعد عدة أعوام.

بدأ اهتمام لنداو بظاهرة الاضطراب فى وقت مبكر يعود للأربعينات، ووضع عام ١٩٤٤ نظريته الكلاسيكية عن بدء الاضطراب. قبل ذلك بسنوات قليلة كان زميل له هو إيبنهارد هوبف Eberhard Hopf قد وضع نظرية عن نشأة "التراوح" wobbles فى سطح السائل المتدفق، وهى ظاهرة تعرف اليوم باسم "التفرع الثنائى لهوبف". كانت نظرية لنداو توسيعا لنطاق نظرية هوبف.



التحول إلى الاضطراب، تمثيل مبسط على فضاء الطور

أسهل طريقة لفهم نظرية لنداو هى بتصور حجر فى مجرى مائى يمكن التحكم فى سرعته. لنفرض أننا وضعنا عدادا للسرعة قبيل اصطدام التيار بالصخرة. حينما يكون التيار بطيئا يسجل العداد سرعة معينة ثابتة، يقابل ذلك جاذبا ذا نقطة ثابتة. لنفرض الآن أننا زدنا من سرعة التدفق شيئا ما بحيث تكونت دوامة خلف الصخرة. هذه الدوامة تنتشر بمرور الوقت إلى أمامها فيسجل العداد زيادة فى سرعة التدفق، ثم تأتى دوامة أخرى تفعل نفس الشيء. فى هذه الحالة تكون سرعة الماء دورية، وهو ما يقابل جاذبا ذا دورة محدودة. إن تفرعا ثنائيا قد حدث حينما انتقل النظام من الحالة الثابتة إلى الحالة الدورية. لنعط تردد الدورة الرمز ت,١

انفرض أننا زدنا سرعة التيار شيئا ما مرة أخرى، سوف تنشأ دوامات أسرع، لنعط ترددها الرمز ت,٢ هذه الدوامة تتراكب مع الأولى. وحيث إن لدينا الآن ترددين، فإن الجاذب يأخذ شكل الطارة. كما رأينا من قبل فإن النظام فى حالة كهذه إما أن

يكون دوريا أو شبه دوري، اعتمادا على النسبة بين الترددين، إذا ما كانت عددا صحيحا أم لا.

لنعد الآن لنظرية لنداو. فطبقا لها تنشأ مع زيادة التدفق أنماط غير دورية، وتكون الحركة فى هذه الحالة ذات بعدين وغير مستقرة. وتؤدى اضطرابات طفيفة أخرى فى التدفق إلى دوامة جديدة بتردد جديد، فيأخذ النظام نمطا شبه دورى ممثل بطارة ثلاثية الأبعاد. يستمر الحال على هذا المنوال مع زيادة سرعة التدفق، دوامات تصنع داخل دوامات، ويتصاعد أبعاد الحالة شبه الدورية إلى أربعة فخمسة وهلم جرا. يستمر التزايد نظريا إلى أن تصبح الأبعاد والترددات لانهائية العدد. أما الاضطراب الواقعى فيحتوى على عدد كبير من تلك الترددات، وعلى هذه الصورة قبلت نظرية لنداو على مدى ثلاثين عاما، إذ لم يتم تفنيدها إلا فى الستينات.

نظرية أبسط

انبرى دافيد رول من معهد الدراسات المتقدمة بالقرب من باريس لنظرية لنداو، وسرعان ما أصبح غير سعيد بها؛ فقد رآها معقدة.

ولد ورل فى غنت بفرنسا عام ١٩٣٥ لأب مدرس للغويات. كان رول ككثير من علماء الرياضيات مغرما بالتجوال، قائلا إنه يعطيه الوقت للتفكير، وعلى خلاف الكثيرين منهم مهتم بالإضافة للرياضيات البحتة بالرياضيات التطبيقية.

وفى عام ١٩٦٨ بدأ اهتمامه بتدفق الموائع، وبدأ يعلم نفسه علم ديناميكا الموائع بدراسة نظرية لنداو فى كتابه "ديناميكا الموائع" مع ليفشتس المذكور آنفا. يقول رول فى كتابه "الصدفة والهيولية": "لقد شققت طريقى عبر الحسابات المعقدة التى بدا أنها تحلو لهما، ثم عثرت فجأة على شيء مثير، قسم عن بدء الاضطرابات لا يحتوى على حسابات معقدة".

وبقراءته لهذا القسم وجده مثيرا للبلبلة. "السبب فى كونى لم أعجب بوصف لنداو لبدء الاضطراب أنه سبق لى أن حضرت محاضرة علمية لرينيه توم وقرأت بحثا لستيفن سمول بعنوان "النظم الديناميكية التفاضلية". كان توم زميلا لرول فى نفس المعهد، أما سمول فقد زار المعهد عدة مرات. وقد ركز سمول على وجه الخصوص على كون بدء الاضطراب يجب أن يضم اعتمادا أبسط على الظروف الأولية، ولم يكن واضحا لرول كيف تدخل هذه الاعتمادية البسيطة فى النظرية.

كتب رول قائلا: "كلما فكرت فى المشكلة قل اقتناعى بالصورة التى عرضها لنداو". لقد كان مقتنعا أن التيار لو احتوى على عدد لانهائى من الترددات لتصرف بطريقة مختلفة تماما عن الشكل المألوف للدفق عند اضرابه.

تآزر رول مع الرياضى الألمانى فلوريس تاكنز فى معالجة المسألة، وبينا أن ثلاثة حركات مستقلة كافية لإنتاج الاضطراب، وليس عددا لانهائيا منها كما ذهب لنداو. ولكنهما احتاجا لشيء آخر، أسمياه "الجاذب الغريب" (لم يكونا قد علما بعد أن لورنز قد عثر على مثل هذا الجاذب بالفعل منذ سنوات). بهذه الطريقة كان بمقدورهما شرح بداية الاضطراب.

نشر العالمان بحثا بعنوان "عن مسألة الاضطراب" On the Problem of Turbulance وأرسلاه إلى مجلة علمية متخصصه، وجاءهم الرد بعد عدة أسابيع. لقد رفض البحث. إن محكم المجلة لم يعجب بالفكرة، معللا ذلك بعد فهمهما للموضوع، وألحق برده عدة أبحاث نشرها هو عنه.

فى ذلك الوقت كان رول رئيس تحرير مجلة علمية أوربية، فتولى هو الأمر. أرسل البحث لنفسه، وقرأه، ثم قبله وأجاز نشره. لقد قام بذلك بكل حذر على حد قوله، وبذلك أصبح هذا المقال من كلاسيكيات أدبيات علم الهيولية.

وحين علم رول بعد ذلك بجاذب لورنز انتابه الفرح.

تفاصيل الجاذب العجيب

بإضافة الجاذب العجيب يكون لدينا أربعة أنواع من الجاذبات، الأخير منها إضافة للقائمة هو الذى يعبر عن حالة الهيولية، فما هو الجاذب العجيب بالضبط؟ إن تعبيرا بسيطا عنه يقول إنه جاذب يعبر عن عدد لانهائى من المسارات لفضاء الطور، بحيث يصبح التنبؤ بمسقبل النظام أمرا غير متيسر. على أن الوصف الأكثر رسمية يحدد خصائص هذا الجاذب فى أربعة:

١ – ينتج بواسطة عدد قليل من معادلات تفاضلية بسيطة.

٢ – بصفته جاذبا فإن كافة المسارات فى فضاء الطور يجب أن تتقارب له.

٣ – تعتمد المسارات بصفة مفرطة على الظروف الأولية، بحيث إن أى تغير أو خطأ طفيف يؤدى إلى تغيير جوهرى فيها.

٤ – ينتمى إلى أشكال الفراكتال.

ينسب المصطلح إلى كل من رول وتاكنز (يوجد تنافس شريف بينهما حول من له فضل السبق فى ذلك). وصفة العجيب تنبع من التناقض فى الخصائص، فكونه جاذبا يعنى تقارب المسارات إليه، وصفة الحساسية المفرطة للظروف الابتدائية تعنى أن مسارين متقاربين سوف يتباعدا تباعدا شديدا فيما بينهما بمرور الزمن. لعل ضم التقارب والتباعد فى كينونة واحدة أمرا يبدو غير معقول، ولكن كما سنرى لقد ضمهما معا الجاذب العجيب.

قبل أن نخوض فى تحليل الجاذبات العجيبة دعنا نتساءل أولا عن أبعادها. لو أنك نظرت إلى جاذب لورنز لوجدت خطوط المسارات متقاطعة، ولكن هذا غير صحيح، ذلك لأنه لو حدث مثل هذا التقاطع فى نقطة ما لأدى ذلك إلى تناقض لا يقبله التحليل الرياضي. فنقطة التقاطع تعنى أن النظام له مساران فى نفس الوقت، وهو أمر غير مقبول رياضيا. يدلنا ذلك على أن الجاذب يجب أن يتكون من صفحات ذات بعدين متراصة بعضها فوق بعض، بحيث يعبر كل مسار فوق أو تحت الآخر. بمعنى آخر يجب أن تكون أبعاد الشكل أكثر من بعدين. من جهة أخرى، فكما رأينا فى جاذب لورنز، إنه يعبر عن نظام تتشتت الطاقة فيه، ويؤدى ذلك إلى انكماش فى أية مساحة أولية بفضاء الطور مع مرور الزمن، بمعنى أن الأبعاد يجب أن تكون أقل من ثلاثة.

إن عدد أبعاد جاذب لورنز إذن بين الاثنين والثلاثة، فهى إذن ليس عددا صحيحا. إن الأعداد الكسرية هى صفة لازمة لأشكال الفراكتل، وهى كما رأينا أحد خصائص الجاذبات الغريبة.

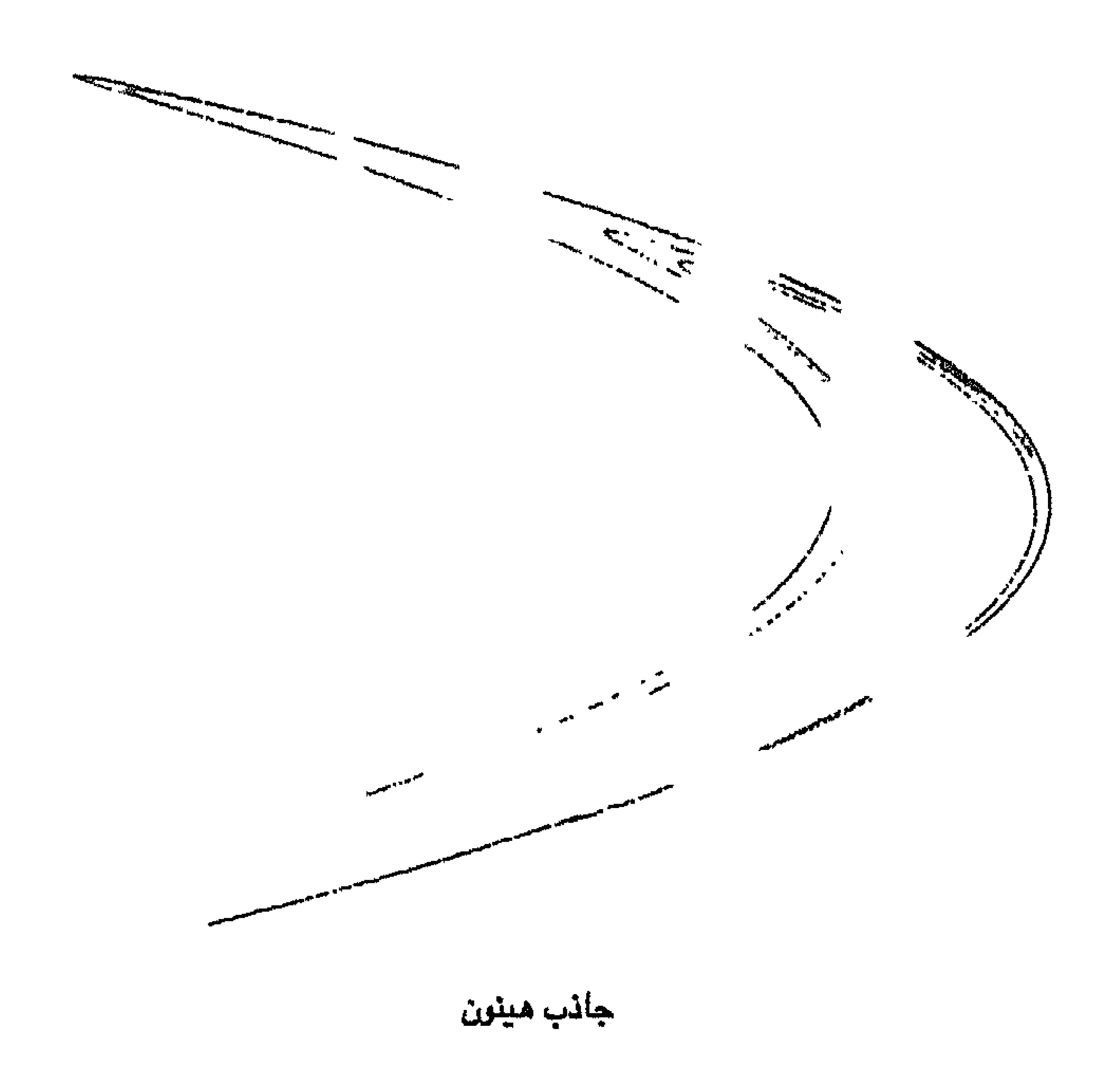
جاذب هينون

فى نفس الوقت الذى كان فيه لورنز يعالج مسألة التنبؤ بالطقس، كان عالم فرنسى فى الفلك، ميشيل هينون Michel Hénon، يعالج مسألة أخرى هى تكدس النجوم فى حشود. لقد تمخضت المسألة عن جاذب عجيب هى الأخرى، وكمثل الجاذب الأول لم يحظ جاذب هينون بالانتباه إلا بعد مرور عدة سنوات.

ولد ميشيل هينون عام ١٩٣١ فى باريس، وتعلق بالعلم فى فترة مبكرة من حياته. كان شغوفا بصفة خاصة بالفلك، ولكن فى نفس الوقت كان ذا ولع شديد بالرياضيات، ومن ثم فقد اختار لرسالته موضوعا فلكيا ذا صبغة رياضية، مسألة تتصل بديناميكية

الحركات النجمية. من الأمور التى شدت انتباه هينون الحشود النجمية، تجمعات من آلاف إلى ملايين من النجوم، قد تعتبر من زاوية معينة مجرات مصغرة، ولكنها فى الواقع مختلفة عن المجرات.

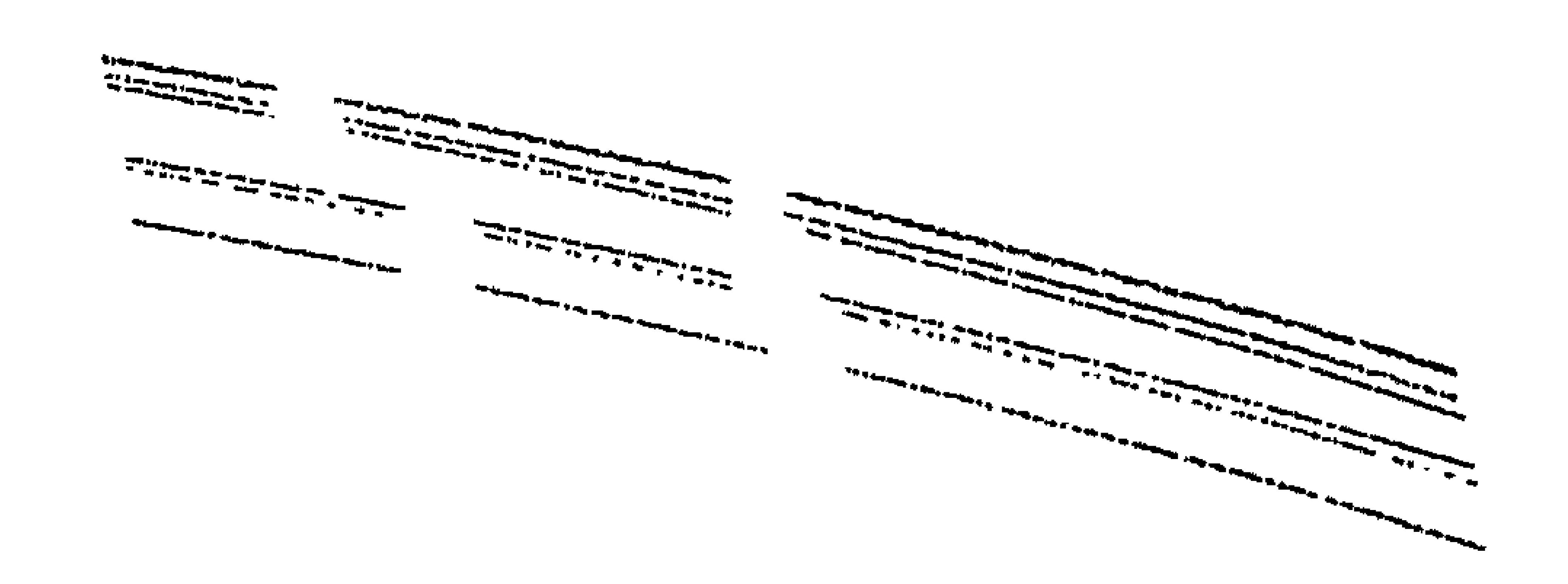
تتكون هذه الحشود من نجوم حمراء معمرة، تدور بلا انتظام حول مركز المجموعة. وتدور الكواكب فى النظام الشمسى حول الشمس لكونها ذات الكتلة الأكبر بين عناصر المجموعة. أما فى الحشود النجمية فإن الجاذبية المركزية ليست متجهة إلى جرم من الأجرام، ولكن نحو قرص ثلاثى الأبعاد.



جاذب هينون

اختار هينون هذا الموضوع لرسالته. ولما كان التجمع النجمى يضم آلافا من النجوم تدور فى عشوائية، فإنه لزم تبسيط المسألة. من الملاحظات الهامة التى وجدها هينون أن هذه النظم تنهار على مدى طويل من الزمن. فالنجوم تتصادم فيما بينها، فتتناثر مبتعدة فى الفضاء، مما يفقد الكوكبة قدرا من طاقتها فتتقلص منهارة على نفسها. إنه نظام مشتت للطاقة، وكما ذكرت فى معرض سابق فإن كثيرا من النظم الفلكية لا ينظر إليها على أنها مشتتة للطاقة، ولكنها على مدى طويل من الزمن تفقد

الطاقة. وقد بينت حسابات هينون أن فقد الطاقة يستمر إلى مالا نهاية، فيقترب النظام من حالة كثافة لانهائية.



جزء من جاذب هينون مكبر ١٠ مرات

وترك هينون المسألة لفترة ما، ثم عاد إليها مرة أخرى حين انتقل إلى برنستون عام ١٩٦٢, لقد أصبح تحت يديه حاسوب يمكنه أن يعمق بواسطته من البحث. وبالتعاون مع طالب دراسات عليا هو كارل هيلز وضعا نظاما من معادلات تمثل مدارات النجوم فى النظام النجمي، بسطاه إلى أكبر درجة ممكنة. وبعد إجراء بعض الحسابات فى فضاء الطور، قام هينون بعمل شيء يشبه ما قام به بوانكريه منذ سنوات. نظر للنجوم وهى تخترق صفحة وهمية، ورأى أشكالا عجيبة، منها ما هو إهليلجات مشوهة، ومنها ما هو على شكل رقم ٨, على أن الغريب فى الأمر على وجه الخصوص كان عدم انغلاق المنحنيات، فلم تكن تعود لذات الموضع، ولا تكرر نفسها أبدا.

من العجيب أيضا أن المدارات لم تكن مستقرة، فالنقاط تتناثر فى عشوائية على صفحة الرسم، تصنع فى بعض المواضع منحنيات، وفى المواضع الأخرى لا تتبع أى نظام. باختصار لقد وجدا نظاما مختلطا بلا نظام.

أنهى هينون العمل وانصرف إلى غيره، وبعد حين انتقل إلى مرصد نيس بجنوب فرنسا. وفى عام ١٩٧٦ سمع عن الجاذب العجيب لكل من لورنز ورول، وتساءل عما إذا كان لهما علاقة بما قام به من قبل.

عاد هينون لدراسة الموضوع، مركزا هذه المرة على الجانب الرياضي منه أكثر من الفلكي، فبسط المعادلات إلى أقصى ما يمكنه، جاعلا منها معادلات فروق بدلا من معادلات تفاضلية. كانت معادلات بسيطة، بل أكثر من معادلات لورنز بساطة. وفي نفس الوقت كان تحت يديه حاسوب يمكنه أن يرسم ملايين النقاط. وما عثر عليه كان شيئا يشبه ثمرة الموز، ومع استمرار البرنامج في العمل كانت تفاصيل الشكل تتضح شيئا فشيئا. وحين ركز على جزء منه وكبره لاحظ أنه يحتوى على بنية تحتية تماثل الشكل الأصلي، وكلما كبر جزءا وجد نفس ظاهرة التماثل الذاتي، لقد كان شكلا فراكتليا.

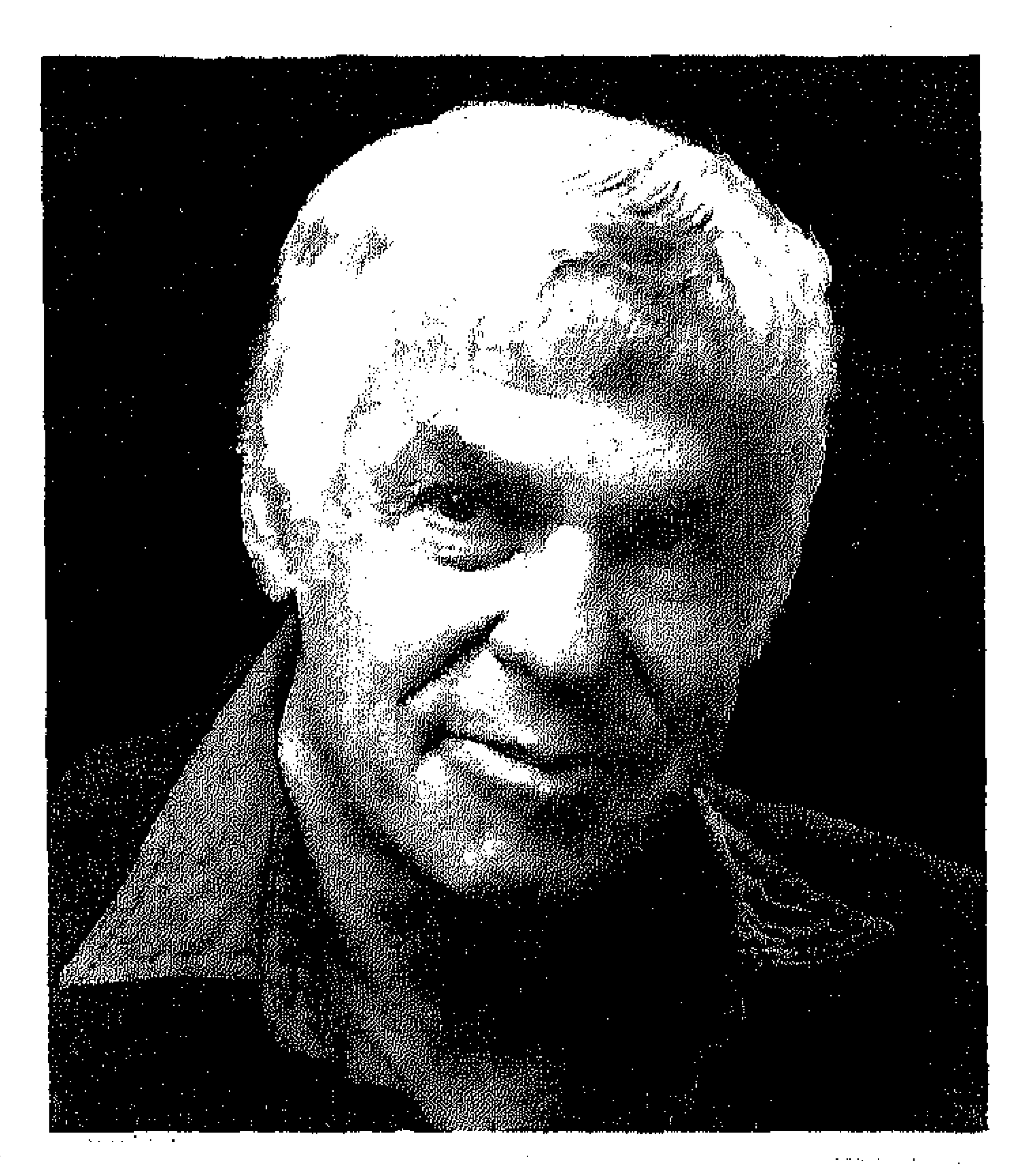
إن ما اكتشفه هينون كان جاذبا عجيبا آخر. كان له بعد بين الواحد والاثنين، في حين كان بعد جاذب لورنز بين الاثنين والثلاثة.

أدرك هينون أن ثمة شيئا خفيا في فضاء الطور يعطي الجاذب هذه الخصائص. كان الفضاء يمط ويطوى. إن مثل هذا النوع من المعالجة الرياضية (التطبيق mapping) قد اقترحه سمول من قبل.

مط وطي فضاء الطور

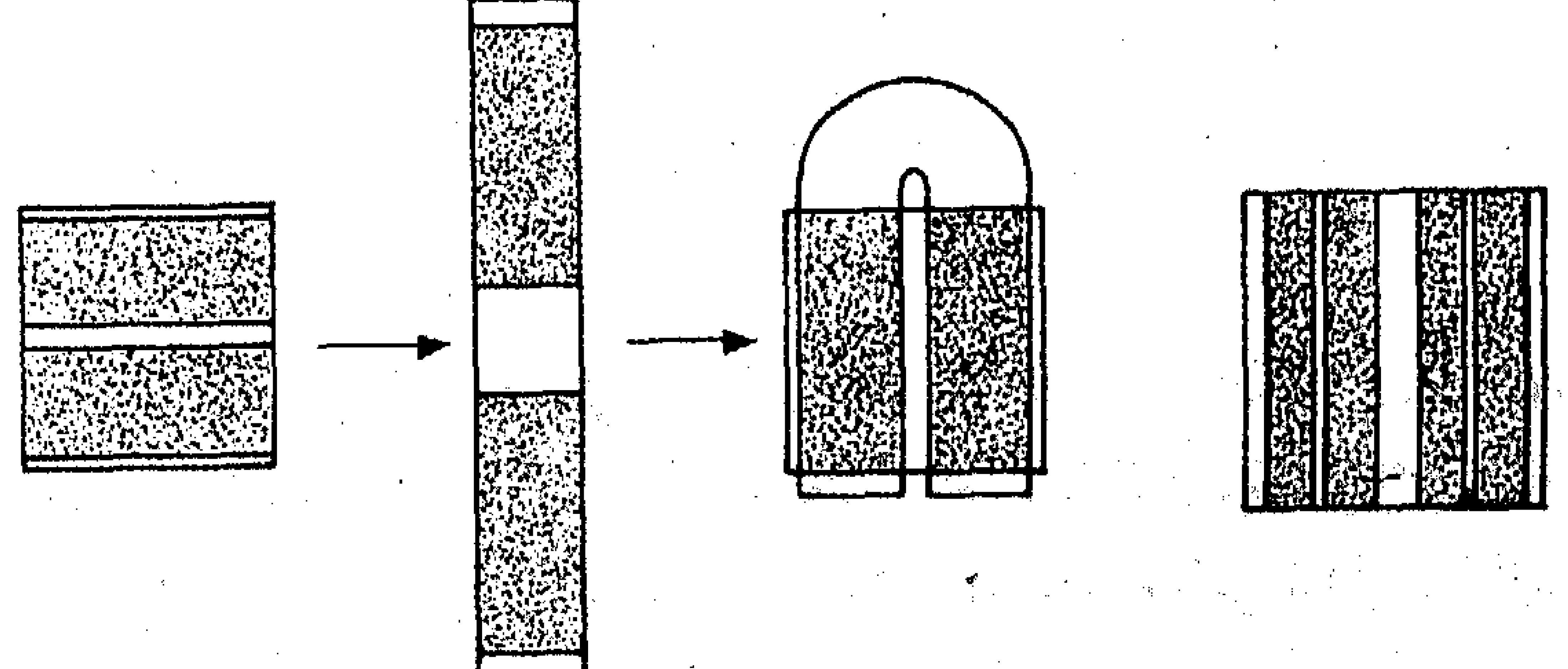
في بداية الستينات بدأ اهتمام ستيفان سمول من جامعة كاليفورنيا بالنظم الديناميكية. ولكونه متخصصا في الرياضيات البحتة فقد عالج الموضوع بطريقة مختلفة عن الآخرين. بحلول الستينات كان قد حاز شهرة عريضة بمساهمته في علم الطوبولوجيا، وهو فرع من الرياضيات يهتم بالأشكال في الفضاء. ما الذى يحدث لو كان الفضاء مصنوعا من المطاط، وطوى أو مط بصورة ما؟ كانت مثل هذه المشكلة هي ما يشغل بال سمول في بحثه عن خصائص النظم.

كان سمول منشغلا على الدوام بالمسائل البحتة، ولكنه أراد أن يوسع من نطاق نشاطه. في أى مجال يمكن أن يطبق هذه المعالجة الطوبولوجية؟ بدا له مجال النظم الديناميكية خصبا، وكان الإلهام آتيا من المهندس الألماني فان در بال، والذى رأيناه سابقا مهتما بذبذبات الصمامات الإلكترونية، وقد وجد بها شيئا من عدم التوقع.



ستيفن سمول

ويرجعنا عمل سمول إلى قضية طرقناها من قبل، التناقض فى خصائص الجاذبات الغريبة. المسارات يجب أن تتقارب لكونه جاذبا، ويجب أن تتباعد بسبب الحساسية المفرطة للظروف الأولية. بين سمول أن هذا التناقض يمكن أن يزال عن طريق تطبيق المعالجة الطوبولوجية على فضاء الطور.



حدوة سمول، يمط ال فضاء فى اتجاه وضغط فى اتجاه آخر ثم يطوى، وتكرر العملية

لقد بين سمول أن المسارات مهما تباعدت فإنها يجب أن تتقارب مرة أخرى، وأن هذا ممكن لو تصورنا تكرار مط وطى فضاء الطور. من أبسط الطرق لبيان كيفية تنفيذ ذلك ما يسمى اليوم بحدوة سمول Smll horseshoe. تنتج هذه الحدوة فى الواقع من عدة تحويلات تخلق شيئا يماثل حدوة الحصان. ابدأ بمستطيل، ثم مطه واطوه ليتحول إلى قضيب طويل، خذ طرفى القضيب واطوه على شكل حدوة حصان، ثم فى النهاية ضع هذه الحدوة فى المربع الأصلي. كرر هذه العمليات من المط والطى إلى مالا نهاية.

من الواضح أن الفضاء يمط فى اتجاه بعد ما ويطوى فى اتجاه بعد آخر. هذا بالضبط ما يحدث للمسارات حين يكون لدينا جاذب عجيب، ويحل معضلة التقارب مع التباعد. كما أن ذلك يجعل الجاذب العجيب محدودا فى مساحة معينة.

باختصار فإن الجاذب يأخذ النقاط المتقاربة ويمطها بحيث تتباعد فى اتجاه معين، وهو ما يخلق التباعد المطلوب لعدم التنبؤ. بعد ذلك "يطوي" النظام هذه النقاط بحين تتقارب مرة أخرى. يمكنك بسهولة أن تتخيل أن هذا هو جاذب لورنز. مساران يتحركان متباعدين حين يستقر أحدهما فى الجناح الأيمن والآخر فى الأيسر، وفى نفس الوقت تطوى المسارات التى تصنع جناحى الفراشة، مما يعنى أنها تتقارب مرة أخرى.

كانت حدوة سمول فتحا علميا مبينا، جزءا من ثورة تدور فى نطاق فهمنا عن الهيولية. وكان اكتشاف الجاذبات الغريبة فتحا آخر، فقد رأينا أنها تشكل حجر زاوية فى هذا الفكر. وعلى الفور نشط الجميع للبحث عن العديد منها. كانت الآمال معقودة عليها أن تخبرنا بالمزيد عن الهيولية.

تعرضنا حتى الآن للبحث عن الجاذبات العجيبة رياضيا، فماذا عن التحقق من وجودها عمليا؟ سوف نرى أن الأوان لذلك كان قد اقترب.

الفصل السادس

التحول إلى الهيولية

أنماط من التذبذب فقط لإنتاج الاضطراب، بينما تطلبت نظرية لانداو عددا لانهائيا منها. لكنها كانت تتطلب وجود الجاذب الغريب، الأمر الذى يقتضى إثبات وجوده معمليا.

كيف يمكنك أن تثبت وجود شيء كالجاذب الغريب؟ فى الوقت الذى وضع فيه العالمان نظريتهما لم يكن من سبيل متاح لتحقيق ذلك. كان أفضل ما يمكن هو بيان أن الاختبارات المعملية تحبذ نظرية على الأخرى، أو أن المشاهدات لا تتطابق مع أية نظرية منهما.

وهذا بالفعل ما حدث فى البداية.

تجربة سويني-جولوب

اتخذت أول خطوة لإثبات نظرية رول-تاكنز بواسطة هارى سوينى من سيتى كولدج بنيويورك وجيرى جولوب من هارفارد كولدج، الذى قدم عام ١٩٧٧ للعمل مع سويني. لم يكن أى منهما يعلم فى الواقع بنظرية رول أو عن الجاذبات الغريبة. كانا يعرفان نظرية لنداو، وبأنها النظرية المعتمدة لوصف بدء الاضطراب. كما كانا يعرفان أن تلك النظرية لم تثبت معمليا، وهذا ما اتجها إلى إنجازه.

كان عالم ديناميكا الموائع الفرنسى م. م. كوليت M.M. Coulette قد قام فى مطلع القرن بتصميم جهاز لدراسة تدفق الموائع، يتكون من إسطوانتين متداخلتين يتخلل الفراغ بينهما السائل المراد إجراء الاختبار عليه، وتدار إحدى الإسطوانتين، وتكون عادة هى الداخلية، بسرعة شديدة، فينجرف السائل معها.

وفى عام ١٩٢٥ قام العالم البريطانى جوفرى تايلور Geofrey Taylor بهذه

وفى عـام ١٩٢٥ قـام العـالم البـريطانى جـوفـرى تايلور Geofrey Taylor بهـذه التجربة، وشاهد نوعا مثيرا من عدم الاستقرار، على صورة ما يشبه حلقات متراصة بعضها فوق بعض. وقد قام من بعده علماء آخرون بإجراء تجارب على سرعات أعلى، واكتشفوا أشكالا عجيبة أخرى من اضطراب السوائل، دوامات متموجة ودوامات ملتوية ودوامات مجدولة ولوالب متموجة.

كانت الحلقات المتراصة تقابل أول تحول إلى الاضطراب قال به لنداو، لو نظرت إليها فقد لا تلحظ حركة ما، ولكن لو ألقيت بها شيئا لرأيتها تتحرك صعودا وهبوطا ودورانا مع دوران الاسطوانة.

وقرر سوينى وجولوب أن يدفعا بالتجربة قدما إلى الأمام، فصمما جهازا صغير الحجم، لا يزيد عن قدم ارتفاعا، وبوصتين قطرا، أما المسافة بين الإسطوانتين فقد كانت لا تزيد عن ١/٨ بوصة.

كانت العقبة الكئود فى التجارب السابقة هى كيفية قياس السرعة، فأجهزة قياس التدفق التقليدية تستخدم مسابر تغمر فى التيار لهذا الغرض، فتؤثر على نمط الاضطراب الناشئ على حساب دقة النتائج. أما سوينى وجولوب فقد نثرا رقائق غاية فى الدقة من الألومنيوم فى السائل، ثم استخدما شعاع الليزر فى قياس سرعتها، فتغلبا على هذا العيب تماما.

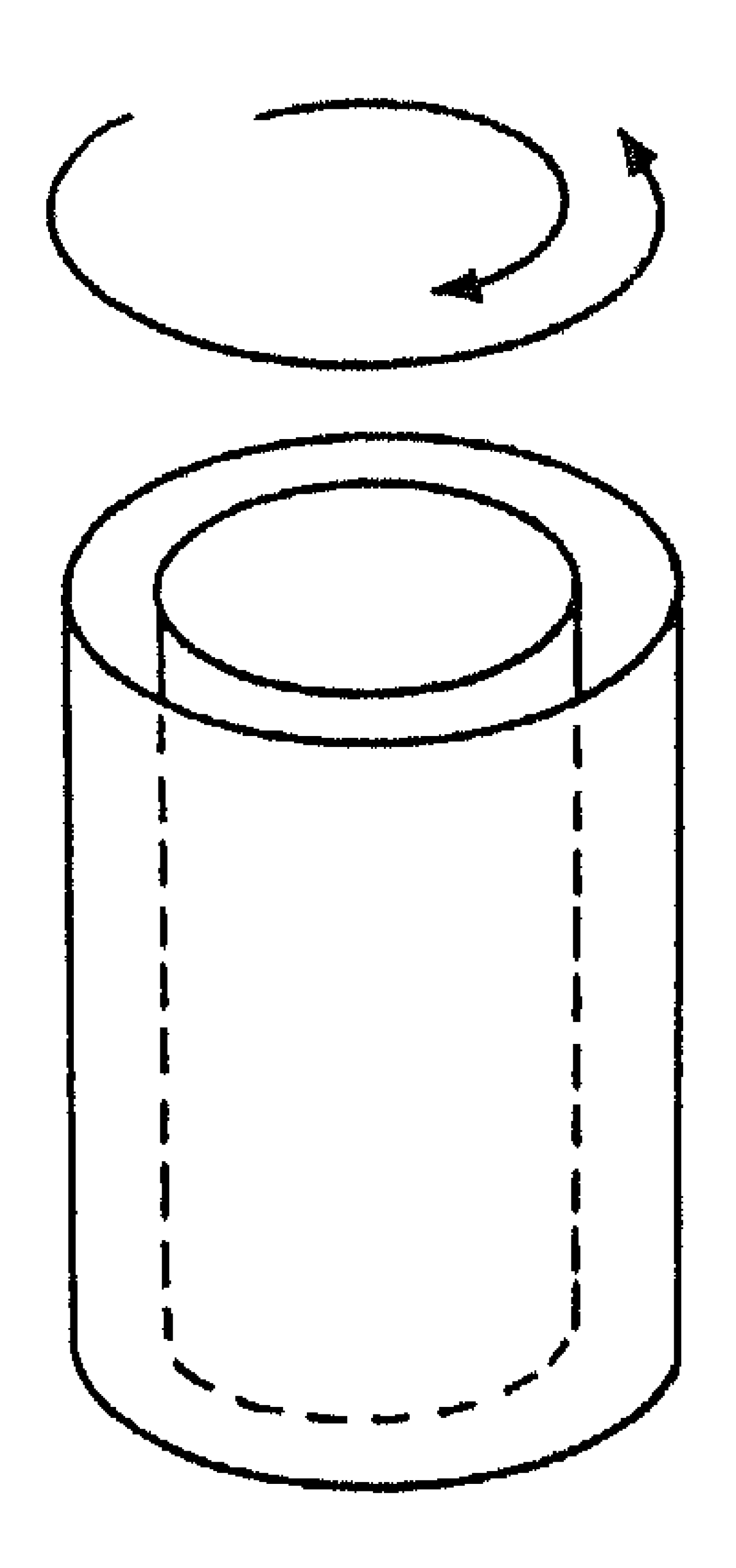
وتركز أسلوبهما فى قياس السرعة على ما يسمى "ظاهرة دوبلر"، وهى ظاهرة مألوفة لنا جميعا. فأنت حين تسمع صفارة قطار أو بوق سيارة، تلاحظ أن الصوت يكون أحدّ قليلا حين تقترب المركبة منك عن نفس الصوت لو كانت المركبة متوقفة، أو أغلظ قليلا عنه حين تكون المركبة مبتعدة عنك. إن نفس الظاهرة تحدث مع تردد أية ذبذبة، إذا ما كانت مقتربة من المراقب ظهر ترددها أعلى من واقعه، وإذا كانت مبتعدة بدت أقل ترددا.

بقياس مثل هذا التأثير على تردد شعاع الليزر أمكن قياس السرعة بدرجة من الدقة لم تتح لمختبر من قبل. على أنه مع زيادة سرعة الدوران نتجت سرعات كثيرة مختلطة ببعضها البعض، ظهرت فى أجهزة القياس كإشارات مركبة، أى ذات ترددات مختلطة. ولفصل الترددات المختلطة يستخدم أسلوب يسمى "تحليل فورير"، نسبة إلى

العالم الفرنسى جوزيف فورير الذى ابتكر هذا الأسلوب عام ١٨٠٧، وبواسطته يمكن إنتاج ما يسمى الطيف الترددى لأية إشارة مركبة، وهو تحليل الإشارة إلى تردداتها الأولية. فى مثل هذا الطيف تظهر الإشارات الأكثر قوة كطفرة فجائية وسط غيرها من ترددات الطيف.

وبواسطة التحليل الطيفى يمكن الحصول على بيانات كثيرة عن طبيعة النظام. فإذا كان النظام شبه دوري، تميز بعدد من هذه الارتفاعات الفجائية، أما حالة الهيولية فتتميز بالوفرة البالغة منها.

كان جهاز سوينى وجولوب بسيطا للغاية بالمقارنة بما عليه أجهزة الاختبار اليوم. فقد كان شيئا يوضع على منضدة محاطا ببعض المعدات الصغيرة. أما اليوم فترى التجارب تجرى بواسطة أجهزة غاية فى التعقيد، قد تصل أثمانها إلى عشرات بل مئات الآلاف من الدولارات. ومما يثير الضحك فى نفسى أن أتذكر تذمر أستاذ لنا فى المرحلة الجامعية فى الستينات بسبب تعقد وارتفاع أثمان معدات التجارب آنذاك، ترى ما عساه يقول اليوم؟



الجهاز المستخدم فى تجربة سوينى-جالوب

كان هدف سوينى وجولوب إثبات نظرية لنداو، ومع بداية التجربة رأيا ما يؤيدها عند أول تحول، فازدادت الثقة فيها. إلا أنه عند التحول التالى مباشرة تبددت تلك الثقة هباء. إنهما لم يشاهدا عددا من طفرات تقابل الحالة شبه الدورية، بل شاهدا بدلا من ذلك تتابعا وفيرا من الترددات تنبئ عن حالة الهيولية.

وطفقا يكرران التجربة، محاولين الاقتراب بحرص أشد من لحظات التحول، وفى كل مرة يفتقدان رؤية تردد جديد يضاف لسابقيه، بل انتقال فجائى لحالة الاضطراب، أو الهيولية.

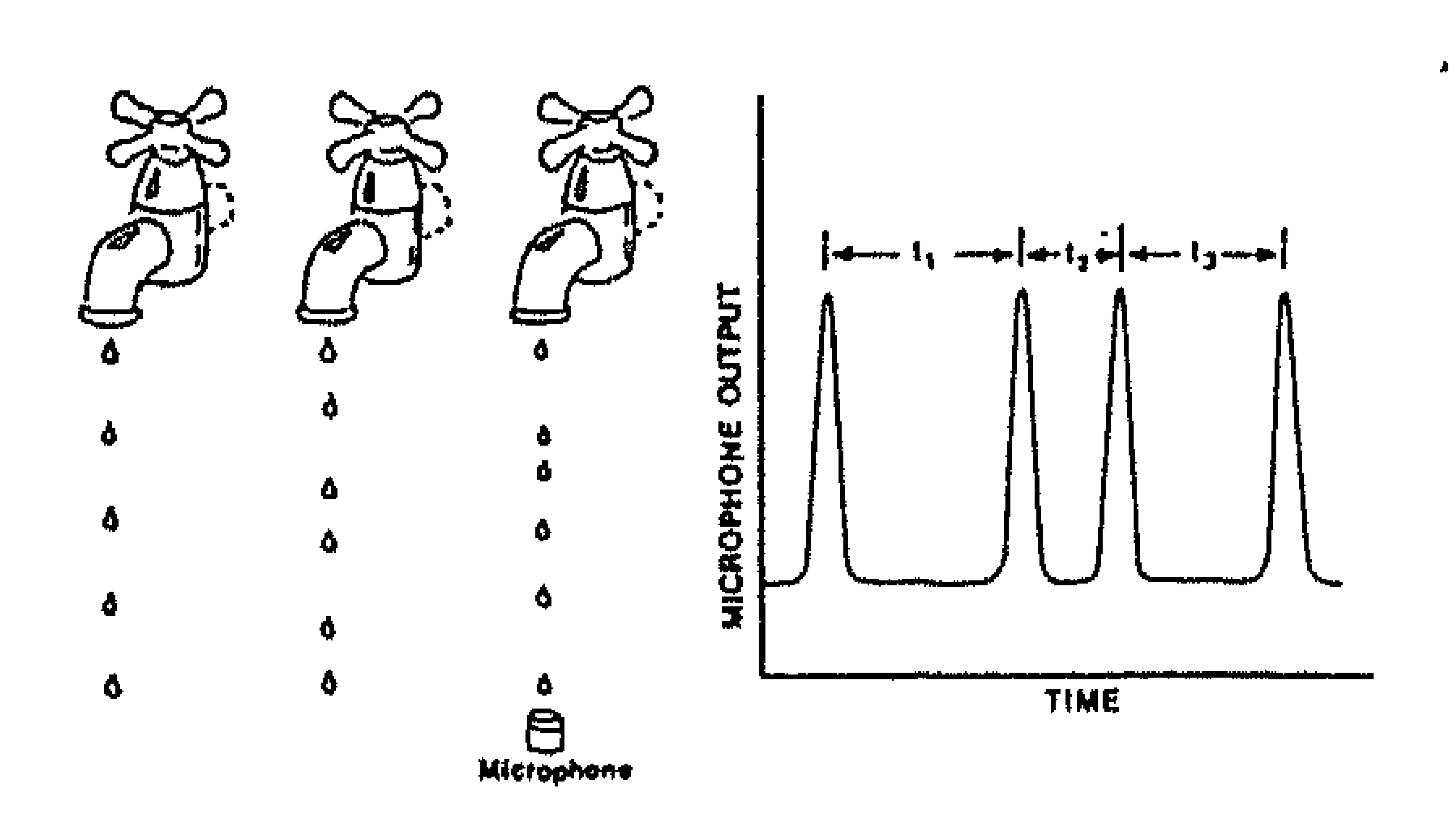
إزاء هذا الموقف لم يكن أمام العالمين ما يفعلانه، لقد خيبت نظرية لنداو أملهما، وهما لم يسمعا بعد عن نظرية رول-تاكينز، فصار طريقهما بالتالى مسدودا. ولكن رول هو من سمع بهما فشد الرحال إلى نيويورك، ليفرح فرحا غامرا بتأييد نتائجهما لنظريته.

حسنا، إن النتائج متعارضة مع نظرية لنداو، ومتوافقة مع نظرية رول-تاكينز. تلك إذن الخطوة الأولى. ولكن اكتشاف الجاذب الغريب يتطلب ما هو أكثر. إنه يتطلب النظر للتدفق نظرة شاملة، بينما لا يستطيع سوينى وجالوب إلا أن ينظرا إليه فى نقاط معينة. إن مطلب اكتشاف الجاذب الغريب من خلال هذه البيانات المحدودة يخرج تماما عن نطاق استطاعتهما.

كان على إنتاج أول جاذب غريب معمليا أن ينتظر إلى بداية الثمانينات، وذلك بفضل بيانات أخذت من تجربة غاية فى الطرافة لبساطتها. يرجع الفضل فى هذا الإنجاز لمجموعة من أربعة رواد من جامعة كاليفورنيا بسانتا كروز، هم: جيمس كرتشفيلد James Crutchfield، ج. د. فارمر J. D. Farmer، نورمان باكارد Norman Packard وروبرت شو Robert Pakard، أما الأساس الرياضى للمنهج الذى اتبعوه فقد وضعه فلوريس تاكينز فى نفس الفترة تقريبا.

كانت تجربة مجموعة سانتا كروز بكل المعايير أعجب تجربة متصورة، مجرد صنبور تتساقط منه المياه. فمن المألوف أنك حين تفتح الصنبور بحيث يكون تساقط قطرات الماء أبطأ ما يمكن، ترى أن هذا التساقط يكون رتيبا. ولكنك مع زيادة الفتحة بدرجة طفيفة، تلاحظ أن الأمر لم يعد بهذه الرتابة، وأن انتظام تساقط القطرات قد

اختل. كانت التجربة عبارة عن وضع لاقط صوت تحت الصنبور، وتسجيل تساقط قطيرات الماء مع وقت حدوثها.



تجربة الصنبور

مع رسم زمن تساقط القطيرات بطريقة معينة (هذه الطريقة أعقد من أن تعرض فى هذا الكتاب) فإن نمطا قد تمت مشاهدته. وحين أجرى نفس التحليل مع جاذب هينون العجيب شوهد نفس النمط، الأمر الذى يعنى أن تجربة الصنبور تنبئ بدورها عن جاذب عجيب. ومن المثير أن تعلم أنه مع زيادة سرعة التساقط ظهرت أنماط أخرى لا تتفق مع نمط الجاذبات العجيبة.

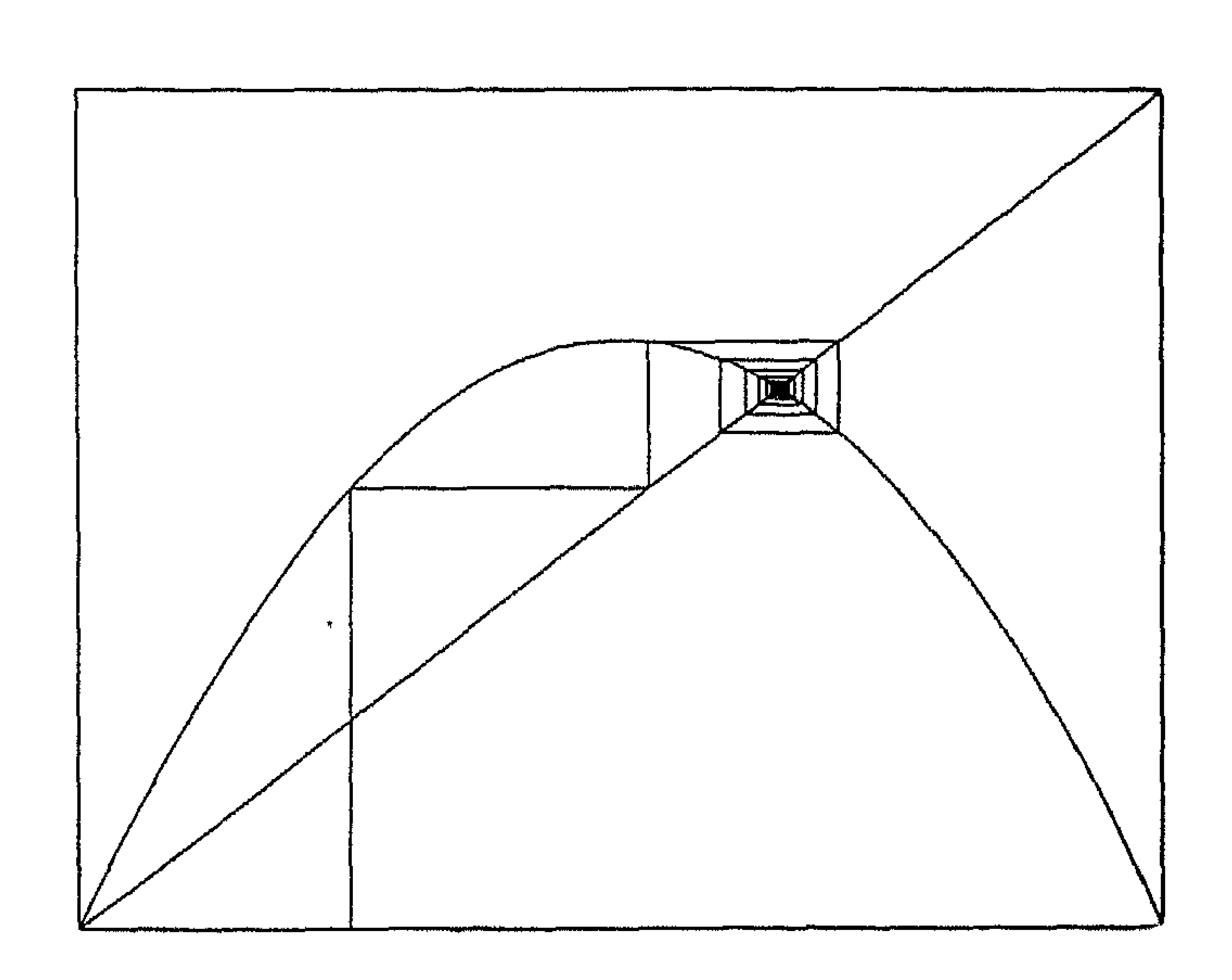
وهناك المزيد مما يمكن أن يستغل من تلك البيانات، سوف نبين ذلك من خلال كشف كل من ب. بلوزوف B. Belousov وأ. زابوتنسكى A. Zhabotinsky من الاتحاد السوفيتى عن التفاعلات الكيميائية فى بداية الستينات. وقد جعل زابوتنسكى من دراسة هذه الظاهرة موضوع دراسة الدكتوراه له.

إن التفاعلات الكيمائية فى حد ذاتها معقدة، ولذا فلن نخوض فى تفاصيلها. الأمر الهام أنه يصاحبها تذبذب فى أيون معين، وتحت ظروف معينة يكون هذا التذبذب هيوليا. فى الثمانينات قام فريق من العلماء بتحليل البيانات المتعلقة بهذا التذبذب طبقا لأسلوب تجربة الصنبور، واكتشفوا أنه بالفعل يحتوى على جاذب غريب. وتأيد هذا الكشف بعد ذلك بتجارب أخرى.

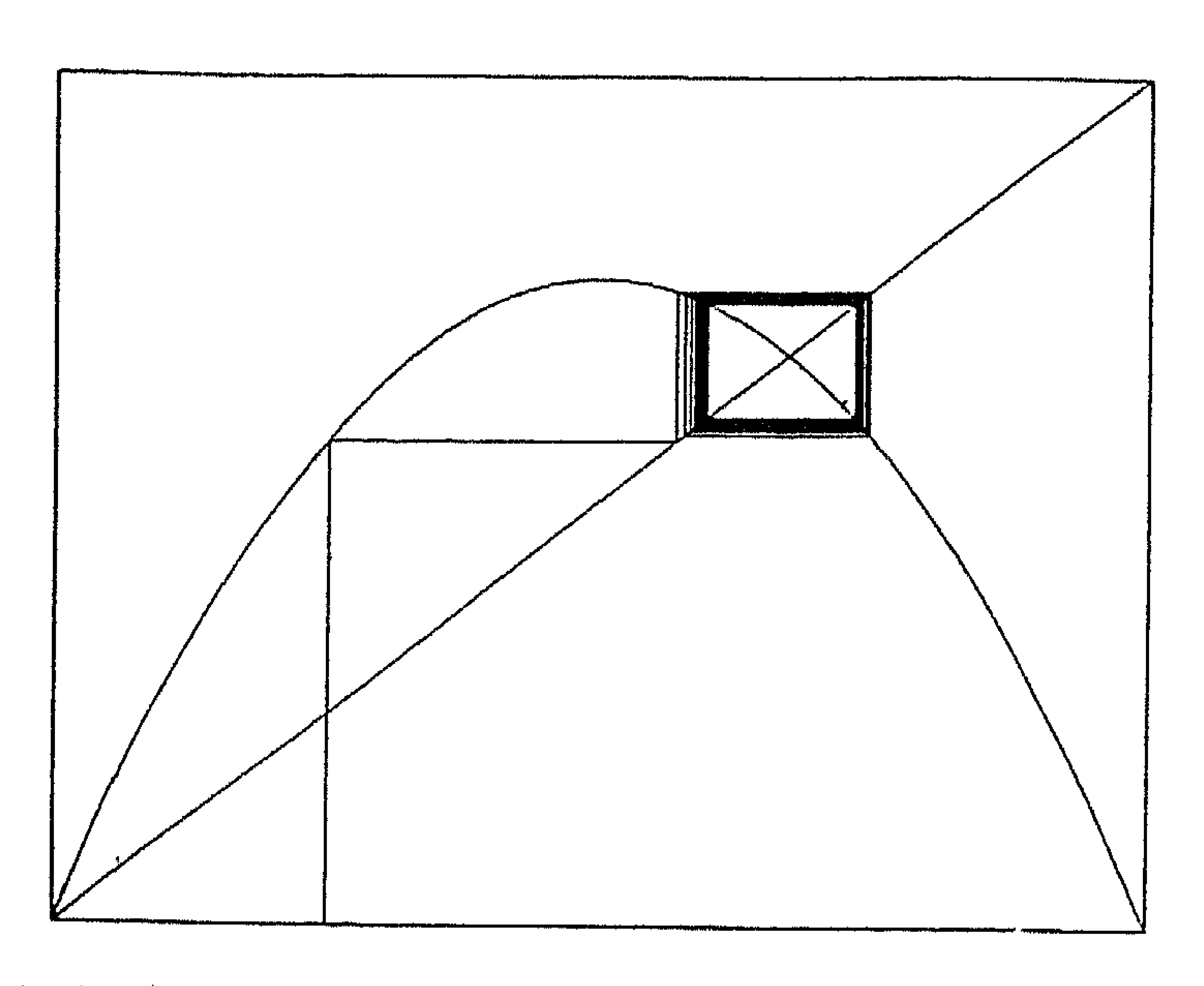
يورك، ماى، والخرائط اللوجستية

ننظر عادة للهيولية على أنها مرتبطة بالنظم الفيزيائية، كالبندولات والقضبان المعدنية المهتزة والنظم الكهربائية والنباتات وما أشبه، ولكنها ظاهرة هامة أيضا فى البيولوجيا، وبالتحديد فى النظم البيئية حيث تلعب دراسات التعداد دورا جوهريا. فمثلا، كيف يؤثر تعداد الأرانب فى منطقة ما فى عام على تعداده فى العام التالى؟

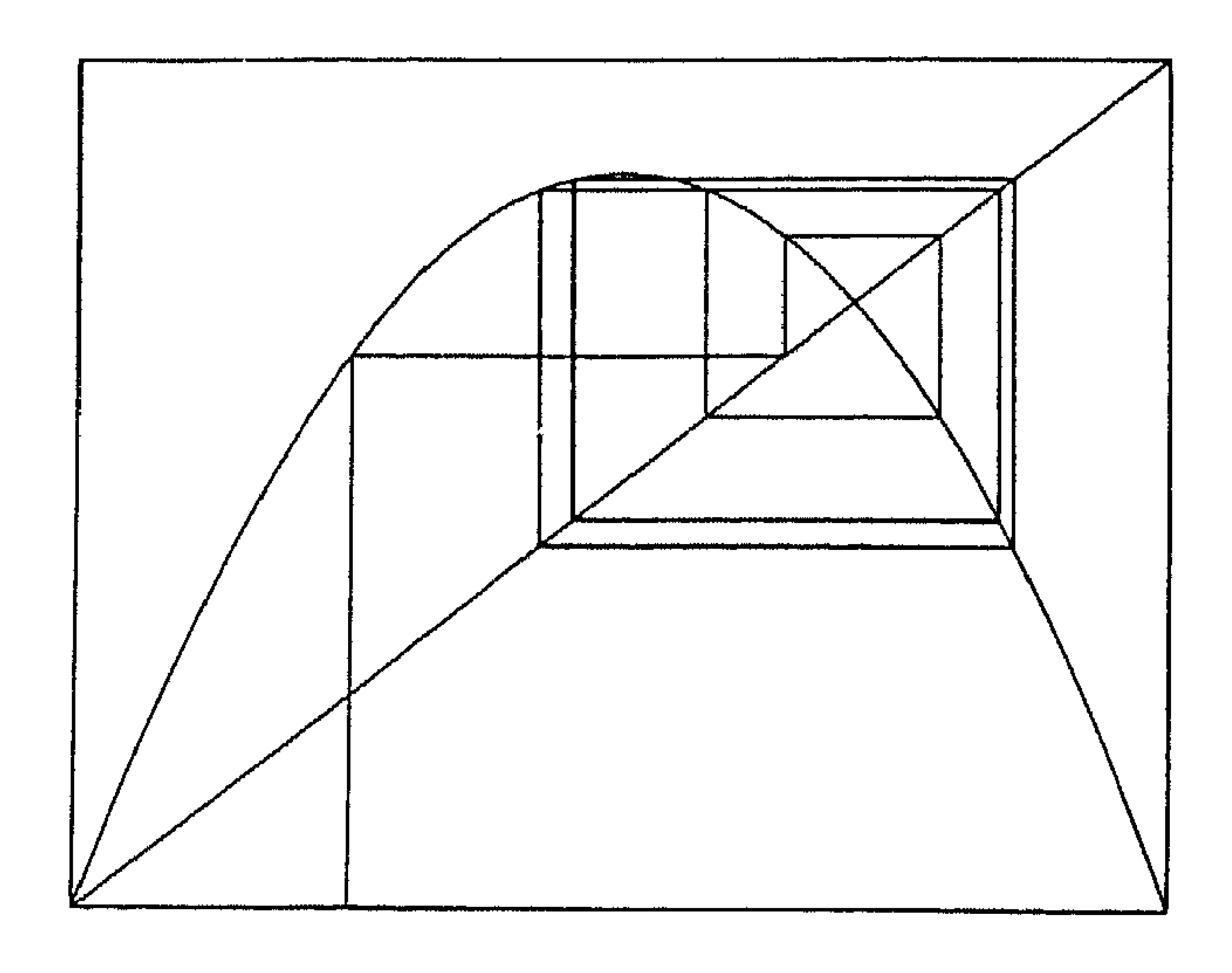
لقد شغل جيمس يورك James Yorke، رياضى من جامعة ماريلاند بهذه القضية فى بداية السبعينات. وقد أثار شغفه بحث لورنز عن الهيولية، فقد أدرك على التو أن الهيولية أمر جديد ومثير يمكنه أن يدلى فيه بدلوه. وبعد بحث الظاهرة بالتفصيل نشر بحثا يعتبر من أهم أدبيات علم الهيولية بعنوان "الدورة الثلاثية تعنى الهيولية Period Three Implies Chaos"، عنوان غريب ولكن، كما سنرى، يحمل رسالة غاية فى الأهمية.



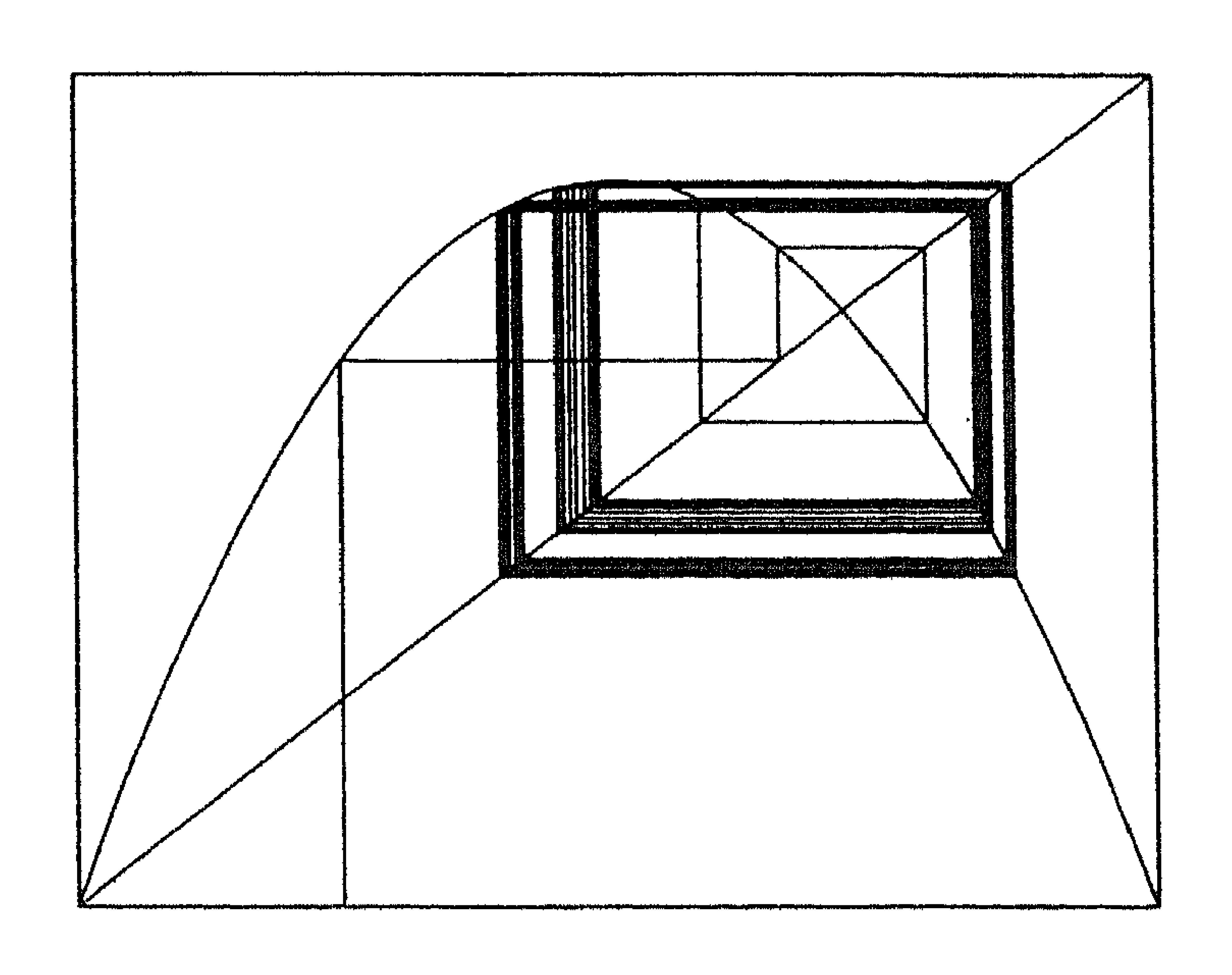
جاذب لوجستى يبين المسار إلى نقطة جذب (الأشكال التالية تبين أثر تغيير المعامل "م")



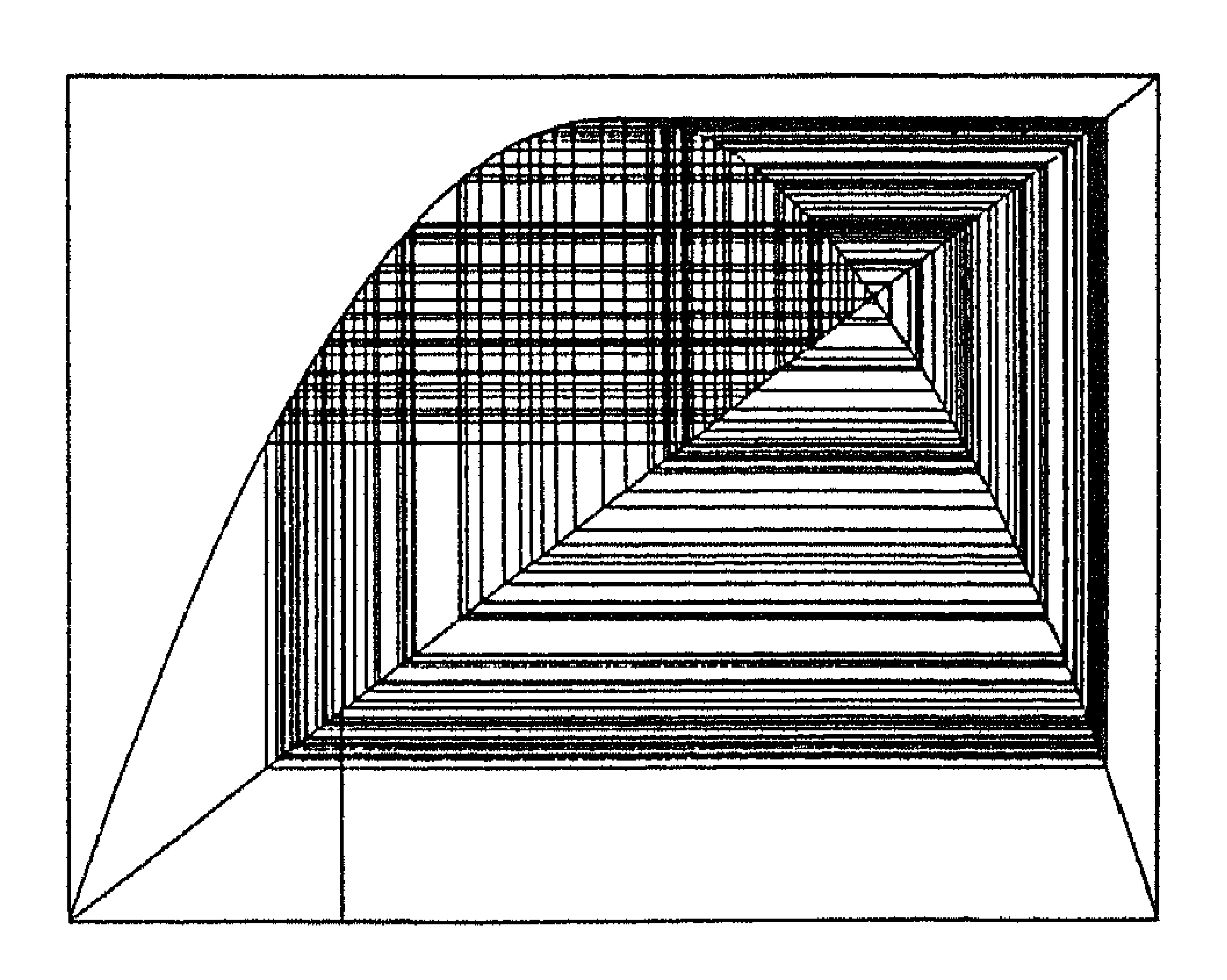
جاذب لوجستى يبين المسار إلى دورة محدودة، "م" فى حدود ٣,٢، التغير بين قيمتين (دورة ثنائية)



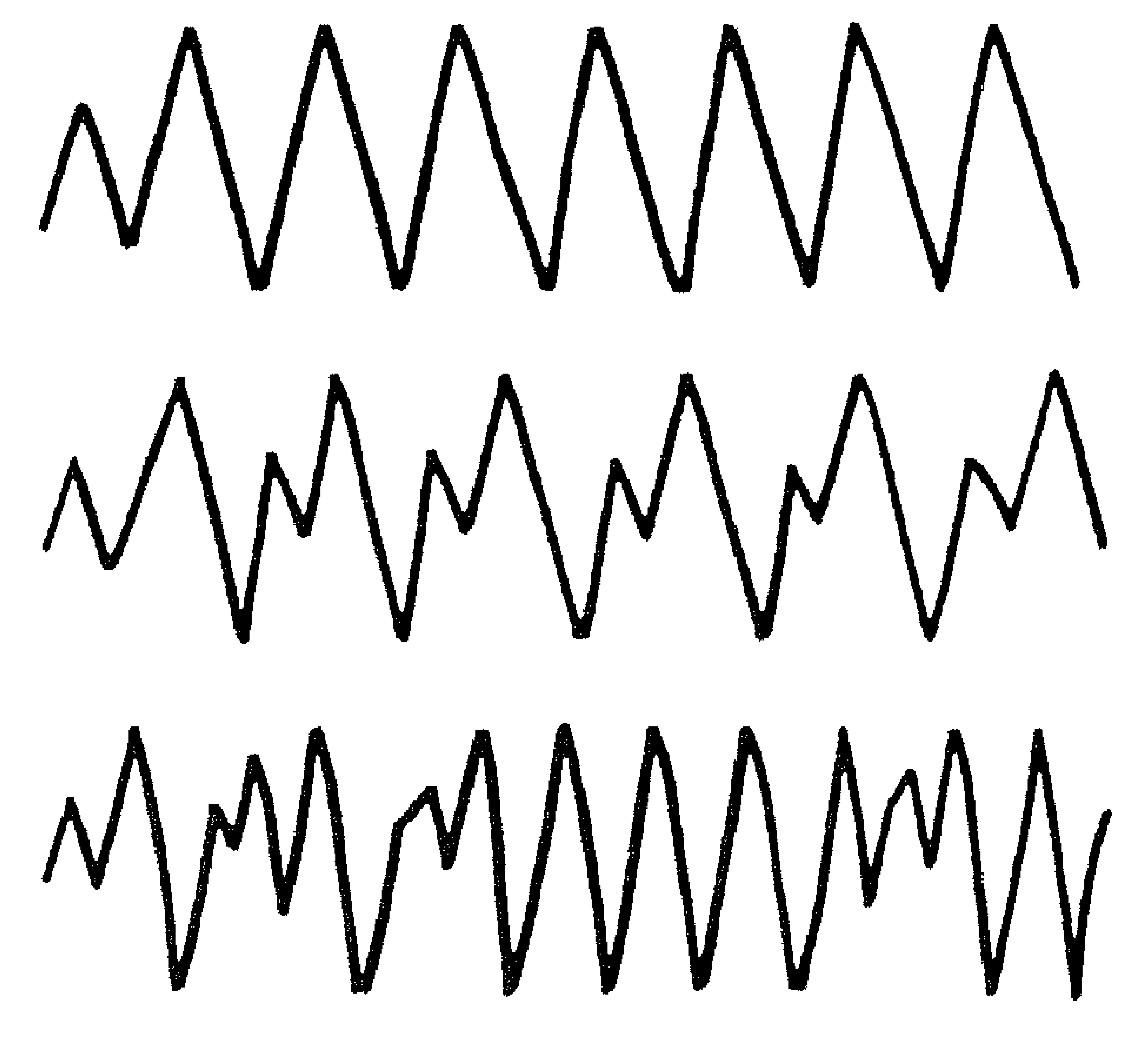
جاذب لوجستى، "م" أكبر من ٣,٢



جاذب لوجستي، التغير بين أربعة قيم (دورة رباعية)



جاذب لوجستي يبين الهيولية، "م" أكبر من ٣,٥٧



شكل مبسط يبين الدورة الثنائية (أعلى) والرباعية (وسط) والهيولية (أسفل)

كمـا أن يورك هـو من أعطى العلم الوليـد اسـمـه. قـبل ذلك كـان العلمـاء يجـدون صـعوبة فـى الاتصـال فيما بينهم. كان من الصـعب أن يتحـدث علمـاء فـى الرياضـيات والفيزياء والكيمياء والبيولوجيا عن علم يفهمه كل واحد منهم بطريقة مختلفة.

وتتبع روبرت ماى خطوات يورك، وأصبح مثله من أكبر أنصار العلم الجديد. كان العالمان صديقين وكثيرا ما تحادثا عن هذا العلم الذى يمثل اهتمامهما المشترك. بدأ ماى كعالم فى الفيزياء النظرية بأستراليا، وفى عام ١٩٧١ ذهب إلى معهد الدراسات المتقـدمة فى برنسـتون حيث تحـول إلى البـيـولوجـيـا، أو بقـول أدق إلى رياضـيـات البيولوجيا. كان من الصعب آنذاك أن تجد عالما فى البيولوجيا مهتما بالرياضيات، ومن ثم فقد كان ماى هو الفارس الوحيد فى الميدان الذى اختاره.

على فترة طويلة جمع العلماء الكثير من البيانات عن تغير تعداد أنواع مختلفة من الحشرات والحيوانات والأسماك من عام إلى آخر. وقد وضعت معادلة تتنبأ بهذا التغير بدرجة معقولة من الدقة، تسمى "المعادلة اللوجستية" أو "التطبيق اللوجستي". إنها معادلة فروق من الدرجة الثانية، أى تربيعية، من النوع الذى يتدرب الطلاب فى المرحلة

المتوسطة على حلها. من الصعب فى الواقع تصور معادلة أكثر سهولة، ولكن نتائجها كانت مرضية فاستمر العلماء فى تطبيقها. كانت من السهولة لدرجة عدم تصور أنها تحتوى على شيء مثير أو غامض. باختصار لم يتوقع منها أحد أية مفاجأة. أما ما اكتشفه ماى فهو أنها مليئة بالمفاجآت.

تحتوى المعادلة على معامل سوف نسميه "م". كانت المعادلة فى حد ذاتها معادلة فروق، بمعنى أنك حين تعوض فيها بقيمة معينة تحصل على القيمة التالية لها. فمثلا، يمكنك أن تعوض فيها بتعداد الأرانب فى عام ما، فتحصل على تعداد العام التالي. بتكرار هذه الخطوات تحصل على متوالية من الأعداد. وأفضل طريقة لتصور هذه البيانات هى توقيعها على مخطط بياني، حيث توقع البيانات المدخلة على المحور الأفقى والمخرجات على المحور الرأسي. حين يرسم الشكل يكون أشبه بقطع مكافئ يشبه الكأس المقلوبة، ويعتمد ارتفاع القطع المكافئ على المعامل "م".

إن ما يهمنا فى الواقع هو التصرف طويل المدى للنظام. بمعنى آخر ما الذى يحدث لتعداد الأرانب على مدى عدة سنوات. ونحصل على ذلك من المخطط المذكور. ابدأ برسم خط يميل بزاوية ٤٥ درجة يتقاطع مع القطع المكافئ. لنفرض أن القطع المكافئ كان فى هذه الحالة ذا قيمة منخفضة للمعامل "م"، لنقل أقل من ٣ (انظر الشكل). خذ قيمة اختيارية على المحور الأفقي، وارسم منه خطا عموديا يتقاطع مع القطع المكافئ، ثم خطا أفقيا يتقاطع مع الخط المائل. من نقطة التقاطع ارسم خطا رأسيا يتقاطع مع القطع المكافئ، ثم خطا أفقيا يتقاطع مع الخط المائل، وهكذا دواليك. حين يكون المعامل "م" منخفضا فإن العملية سوف تدور فى لولب إلى أن ينتهى إلى نقطة على القطع المكافئ، تقابل جاذبا ذا نقطة ثابتة، بما يعنى تعدادا ذا قيمة ثابتة.

والآن، زد قيمة المعامل "م" ليكون أكبر من ٣، وليكن إلى ٣.٢، ثم قم بنفس الخطوات السابقة، تر أن الأمر صار أكثر تعقيدا. لن تتلولب الخطوط إلى نقطة على القطع المكافئ، بل تنتهى إلى أن تدور دون انقطاع حول مربع، مما يقابل جاذبا ذا دورة محدودة.

إن ما حدث هو أن النظام قد تحول إلى الدورية، وهو ما يسمى الدورية الثنائية، بمعنى أن التعداد يتراوح بين قيمتين بصفة دورية.

ومع زيادة المعامل "م" بدرجة أكبر تجد أن النظام قد أخذ يتردد بين أربع قيم، ثم عند درجة أكبر عند ثمانى قيم، ويطلق على هذه الظاهرة "التفرع الثنائي". وعند "م" تساوى ٣,٥٧ تجد أن الأمور قد خرجت عن أى انتظام، لقد دخل النظام فى حالة الهيولية.

كانت هذه هى المعادلة التى تعامل معها ماى فيما يتعلق بالنظم البيئية، مغيرا من قيمة المعامل "م". فعند قيمة له أقل من ١ يؤول التعداد إلى صفر، وفيما بين ١ و٣ يستقر عند مقدار ثابت، وعند قيمة أكبر من ٣ يصبح متأرجحا بين عدة قيم، فيعلو فى عام وينخفض فى عام تال.

وأخذ ماى يختبر تصرف المعادلة مع قيم مختلفة من المعامل "م"، ورسم نتائجه على مخططات بيانية. فوجد دورة كل عامين، ثم كل أربعة أعوام، فثمانى أعوام، فستة عشر عاما، وهكذا إلى أن تختلط الأمور ويدخل النظام فى حالة الهيولية.

ومن الغريب أنه خلال مرحلة الهيولية يحدث أن يدخل النظام فى دورات على مدى ضيق، تشبه النوافذ داخل حالة الهيولية، وتكون الدورات فى تلك النوافذ كل ٣ سنوات، ثم ٧، وذلك إلى حين ثم تعود حالة الهيولية مرة أخرى.

الشيء الهام هنا أن النظام يضاعف من دوراته على مدى أسرع وأسرع، فإذا ما دققت النظر وجدت نسخا أدق من الشكل العام، وهو ما أطلقنا عليه "التماثل الذاتي"، وهو كما قدمنا خصيصة جوهرية لحالة الهيولية.

لقد تعاملنا إلى الآن مع معادلات، يفترض أنها تتنبأ بما يحدث فى العالم الواقعي. فهل هذا ما يحدث بالفعل؟

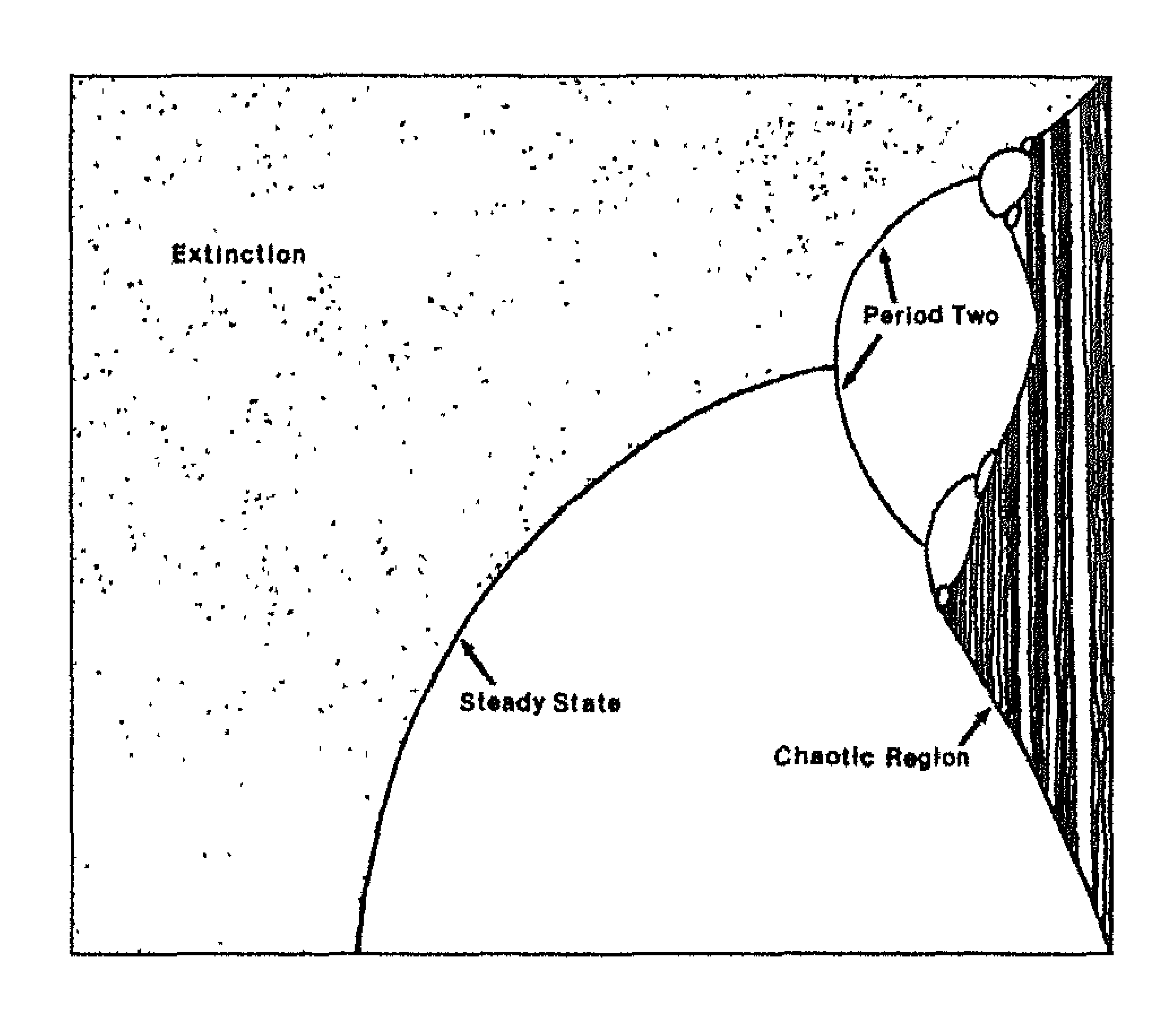
لقد أجريت تجارب معملية على حشرات مثل بقة الفراش، ووجد التفرع الثنائى كما تنبأت المعادلة. صحيح أنه قد تختلط عوامل خارجية بالنظام، ولكن النتائج تؤيد النظرية بقدر كبير.

وقد وصف يورك العديد من مثل هذه النتائج فى بحثه، وأثبت أنه ما من مرة تظهر فيها دورة ثلاثية فى نظام وحيد البعد إلا وتظهر دورات على مقاييس أكبر، وأيضا حالة الهيولية.

فايجنباوم

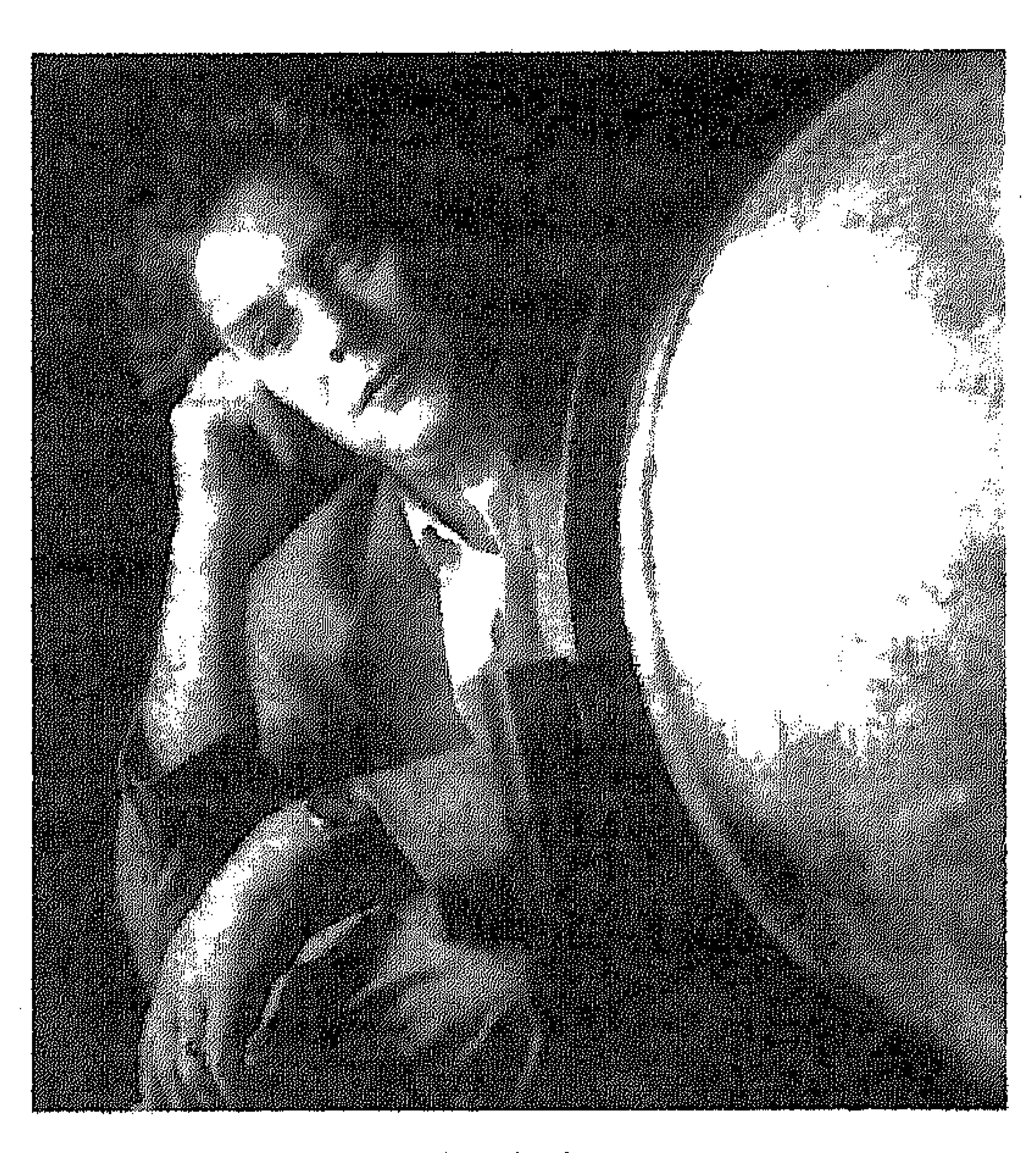
اتضح أن الهيولية أعقد مما تصور الجميع، فهى لا تزال تحتوى الكثير مما لم يكشف عنه بعد.

تطلب الأمر شخصا مناسبا للموقف، وتمثل هذا الشخص فى ميتشل فايجنباوم من أبناء نيويرك ميلادا ونشأة لأب كيميائى وأم مدرسة. عرف بالامتياز فى الدراسة، خاصة فى الرياضيات التى برع فيها بالتعامل مع الأرقام والدوال المثلثية ووضع الخوارزمات وغير ذلك من مهارات.



تضاعف الفترات تقود للهيولية، لاحظ النوافذ فى مناطق الهيولية

بعد تخرجه من سيتى كولدج عام ١٩٦٤ التحق بمعهد التكنولوجيا بماشاسوستس حيث حصل على درجة الدكتوراه فى الجسيمات الأولية عام , ١٩٧٠ وعلى مدى السنوات القليلة التالية لم يظهر من الإنتاج ما بدا منه بعد ذلك، ولكنها مع ذلك كانت فترة هامة للغاية. كان يتمثل فى ذهنه خلالها المعلومات التى تؤهله لأن يلعب الدور المقدر له. لقد أنفق أربع سنوات فى معهد كورنل وفريجينيا دون نشر أى بحث، ثم التحق بالمعمل الوطنى بلوس آلاموس فى نيومكسيكو.



ميشيل فايجنباوم

كان فايجنباوم، كأغلب المبدعين، غارقا في الأحلام، يبدو أن نظره معلق بالسحاب أكثر من أى شيء آخر. الواقع أنه لم يكن يحلم أحلاما فارغة، بل كان يفكر. كان يفكر بالهيولية. لقد وظفه رئيسه في لوس آلاموس لكي يفكر. كان يعرف النبوغ حين يراه، ويعلم أن فايجنباوم يملك عناصره، ولذا فقد توقع منه شيئا من جلائل الأعمال. الغريب في الأمر أنه على مدى عدة أشهر بعد وصوله إلى لاس آلاموس لم يكن أحد يعلم ماذا يفعل بالضبط، وما الموضوع الذى يدرسه. من الصعب تصور أن شخصا يكون له كل هذه الإمكانيات، إمكانيات أن يفعل أى شيء، وأن يدفع له راتب لمجرد ذلك. إن أساتذة الجامعة في مثل وضعه لديهم محاضرات يؤدونها، وزملاؤه في الشركات الكبرى يعينون على مشاريع محددة تبرر أجورهم.

على أن رئيس فايجنباوم كان واثقا من أن الرهان يستحق المجازفة. كان موقنا أن الصبر سوف يؤتى ثماره يوما ما. وهذا ما تحقق بالفعل. لقد اتضح أن فايجنباوم لدية بالضبط ما هو مطلوب لفتح علمى مبين فى علم الهيولية. كان متخصصا فى الفيزياء النظرية، مع خلفية قوية فى مجال الجسيمات الأولية، وهو مجال متميز تماما عن الهيولية، ولكن العجيب أنه وصل بينهما.

إن الأسلوب المعتاد لحل المسائل المتعلقة بالتفاعل بين الجسيمات الأولية هو نظرية الاضطراب، وهى تستدعى رسم العديد من الأشكال عجيبة المظهر تسمى أشكال فاينمان، نسبة إلى واضعها ريتشارد فاينمان الحاصل على جائزة نوبل. لقد قضى فايجنباوم سنوات يبذل جهدا شاقا فى إجراء الحسابات بهذه الطريقة، ثم قال لنفسه يوما ما: "لا بد من وجود شيء أفضل".

وبالنسبة له كان هذا صحيحا. فهو حين حول نظره إلى الهيولية لم يكن يحلم أن تلعب خلفيته فى فيزياء الجسيمات أية أهمية فى هذا المجال. كانت المعادلات فى مجال الهيولية أبسط بمراحل، ولكن الحسابات ليست أقل إرهاقا. ولكنه سرعان ما تحقق من وجود عالم بأسره ينتظره خلف تلك المعادلات البسيطة.

بدأ يفعل ما قام به ماى من قبل، التأمل فيما يحدث لمعادلة الفروق حين يتغير معاملها. كان واثقا من وجود شيء ما لم يفهمه ماى وأقرانه. على أن محاولاته الأولى لم تعط نتيجة تذكر. وفى عام ١٩٧٥ حضر مؤتمرا فى أسبن بكولورادو وسمع من سمول عن الهيولية. لقد ذكر سمول أن المعادلات بسيطة حقا، ولكنه متأكد من أنها تخفى مالم يكتشفه أحد من قبل. وقد أكد أن المجال مفتوح على مصراعيه، وأن اكتشافات هامة على وشك الظهور.

فكر فايجنباوم فى الأمر، ما هو الشيء المفقود يا ترى؟ عاد إلى المعادلة اللوجستية، وما تتمخض عنه من تفرعات ثنائية متتالية، وسرعان ما انتابته الدهشة لفيضان المعلومات الذى تفجر منها.

لقد نظر الكثيرون إلى ظاهرة التفرع الثنائي، وكيف يتحول إلى حالة الهيولية، ولكن فايجنباوم مد بصره إلى ما هو أبعد. لقد بدأ يأخذ نظرة شاملة لتصرف المعادلة، مستخدما آلة حاسبة يدوية من طراز .HP-65 وقد تتعجب لإصراره على استخدام هذه الآلة بينما تحت يديه الحواسب التى تقوم بالعمل أسرع آلاف المرات.

يقول فايجنباوم أن السبب أنه كان مغرما بالتلاعب بالأرقام. فمنذ صباه كان يحب أن يرى كيف تخرج الأرقام للوجود وما هى العلاقات بينها وأثر تغير الظروف على تلك العلاقات. لقد أعطاه هذا إحساسا بما يجري، لم يكن يستهويه العمل مع حاسوب يخرج له آلاف الأرقام فى عدة دقائق. إن هذا الغرام باللهو بالأرقام هو ما فتح له باب الكشف الرائع الذى تحقق على يديه. لو كان يستخدم الحاسوب لفاته ذلك بكل تأكيد.

كان العمل شاقا باستخدام الآلة الحاسبة اليدوية، وبطيئا فى نفس الوقت، وشيئا فشيئا بدأ يشغل ذهنه بتوقع ما يلى من أرقام، حتى غدا ماهرا فى ذلك، ثم بدأ العجب ينتابه حين وجد شيئا من انتظام فى تتابع التفرعات الثنائية. لقد كان ذلك يحدث بنسبة تبدو ثابتة، حسب قيمتها فوجدها ٤,٦٦٩ رقم عجيب، فهل له يا ترى أى معنى؟ أيمكن أن يكون أحد ثوابت الطبيعة؟ وبمناقشة زملائه ظنوا أنه مجرد اتفاق عارض.

إن الأمر الهام فى الموضوع أن هذا الرقم كان يعبر عن نسبة ثابتة، تدل على المقياسية التى تتميز بها الظواهر الهيولية، الشيء يتكرر بنفس النمط على مقاييس أصغر وأصغر. وراح يحاول دقة أكبر مع هذا الرقم العجيب، فوجده ٤,٦٦٩٢٠١٦٠

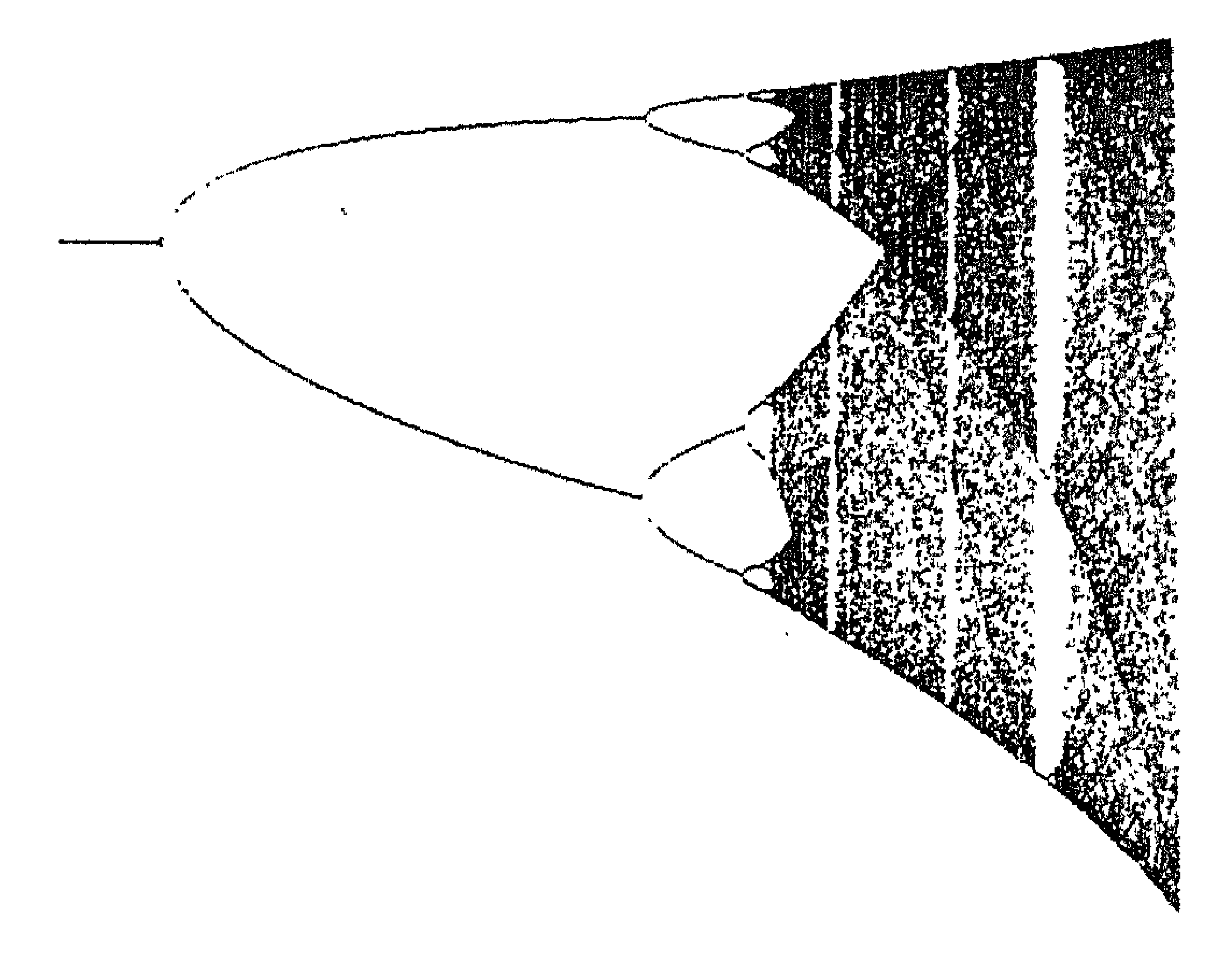
ثم توالت الأحداث، فقد انبرى يحاول مع معادلة ثانية من المعدلات التى تنتج الهيولية، تختلف عن المعادلة الأولى اختلافا بينا، فهى مبنية على النسب المثلثية، وإذا بالتفرع يحدث تماما كما حدث للأولى. وقام بحساب نسبة التقارب بين أوقات حدوث هذا التفرع، فوجده بالضبط ٤,٦٦٩٢٠١٦٠!

بدا الأمر مستحيل التصديق! كيف يحدث هذا التوافق؟ لم يكن الأمر اتفاقا عارضا، فالمعادلتان مختلفتان جد الاختلاف.

كان قد عثر بكل وضوح على ثابت من ثوابت الطبيعة العامة، مثل النسبة التقريبية وثابت الجاذبية وغيرهما من ثوابت. أدرك فايجنباوم أنه لا بد من سبب خفى وراء هذا الرقم، لا بد من وجود نظرية ما. بدأ يشحذ الذهن بحثا فى الأمر، وهنا تدخلت خلفيته عن الجسيمات الأولية فى الموضوع. إن الرقم يعنى ضمنيا وجود المقياسية، وهو ما أوحى إليه بعملية "إعادة الاستنظام"، أسلوب لمعالجة المعادلات الأولية يرجع للثلاثينات. إن معادلة المجال الموحد فى النظرية الكمية، وهى النظرية التى تبحث فى تفاعل

الجسيمات الأولية والفوتونات، دخلت فى مأزق بسبب ما تؤدى إليه من قيم لانهائية، وهو ما يدمر المعنى الفيزيائى للنتائج تماما. وقد اقترح فيكتور فايسكوبف Victor Weisskopf من معهد MIT أن هذه القيم اللانهائية يمكن امتصاصها بإعادة تعريف الكتلة والشحنة، إذ يمكن إعادة مقياس كل منهما. وقد بين هانز بيث Hans Bethe أن هذه الطريقة ناجحة بالفعل، ومن ثم تعتبر جزءا لا يتجزأ من نظرية المجال.

وقد اهتم بالفكرة كن ويلسون Ken Wilson من كورنل بعد عدة سنوات فيما يتعلق بمسألة أخرى. لقد بدأ ويلسون، مثل فايجنباوم، على مهل فى البداية، ثم على حين فجأة تفجر نبوغه أبحاثا أوصلته للفوز بجائزة نوبل. كان مناط اهتمامه ما يسمى بمجموعات إعادة الاستنظام، أسلوب وضعه للتعامل مع التفاعلات بين الجسيمات الأولية.



تتابع تضاعف الفترات

كانت هذه الطريقة ناجحة ليس فقط فى ظاهرة التفاعلات بين الجسيمات، بل أيضا فى دراسة ظاهرة التحول الطوري، التحول الذى يحدث بين حالة من الحالات وحالة أخرى، كالصلابة إلى السيولة أو السيولة إلى التجمد. لقد رأى فايجنباوم على الفور أن التحول من الحالة الثابتة إلى التفرع الثنائى إلى الهيولية يحدث بنفس

الصورة التى يتم بها تحول الطور، كما أن نظرية ويلسون كانت تتضمن المقياسية، ومن ثم فلا عجب أن تتضمنها نظرية الهيولية أيضا.

ما هو إعادة الاستنظام؟ أولا: لو أن المقياسية موجودة فإنه يكون بإمكاننا أن ننزل إلى مقياس أصغر ونحصل على نفس النتائج بالضبط. فبمعنى معين فإننا ننظر النظام تحت ميكروسكوب تزداد قوته شيئا فشيئا. فإذا ما وصلنا إلى نهاية هذه العملية فإننا نصل إلى توازن ليس موجودا بطريقة أخرى. باختصار، فى نظام إعادة الاستنظام فإن التماثل الذاتى أمر محدد exact، وليس تقريبيا كما يوحى وجوده طبيعيا، وعلى ذلك فإن إعادة الاستنظام تعطى توازنا وتحديدا. بهذا أمكن لفايجنباوم أن يبين مدلول الثابت العجيب.

من الغريب أنه حين نشر فايجنباوم بحثه رفض أن ينشر، ولم يكن لديه فرصة رول للتحايل على ذلك. ولكنه كان موقنا من أهمية البحث، فراح ينشره من خلال المحاضرات، مما أدى إلى انهمار الطلبات على البحث.

طرق مختلفة للهيولية

مع تركيزنا على التتابع لظاهرة التفرع كطريق للهيولية، قد يبدو أنه الطريق الوحيد للهيولية، ولكن هذا ليس صحيحا. فسابقا رأينا أن رول قد وجد طريقا آخر، طريقا يحتاج فقط إلى ثلاثة أنماط للاهتزاز. كان طريقه يسمى عادة طريق شبه الدورية. يحدث أول تحول، ثم الثاني. وحين تكون الدورتان غير متناسقتين فى ترددهما، تحدث شبه الدورية، وهو ما يمثل بمسار على على شكل الطارة. تحدث الهيولية حين تتفتت الطارة مع تغير المعامل، عندئذ تتحول الطارة إلى جاذب غريب.

يوجد طريق ثالث للهيولية يسمى "التقطع"، فى هذه الحالة تظهر ارتفاعات فجائية فى الطيف، وتزداد عددا إلى أن تحدث حالة الهيولية.

كان فهم التحول إلى الهيولية من أهم اكتشافات العلم قاطبة، فقد رأينا أن المعادلة اللوجستية التى تستخدم للتنبؤ فى النظم البيئية قد لعبت دورا رائدا. من خلال دراسة تفصيلية لهذه المعادلة رأى العلماء تتابع التفرع إلى الهيولية. الأكثر من ذلك، لقد اكتشفوا الثابت العام لتتابع هذا التفرع.

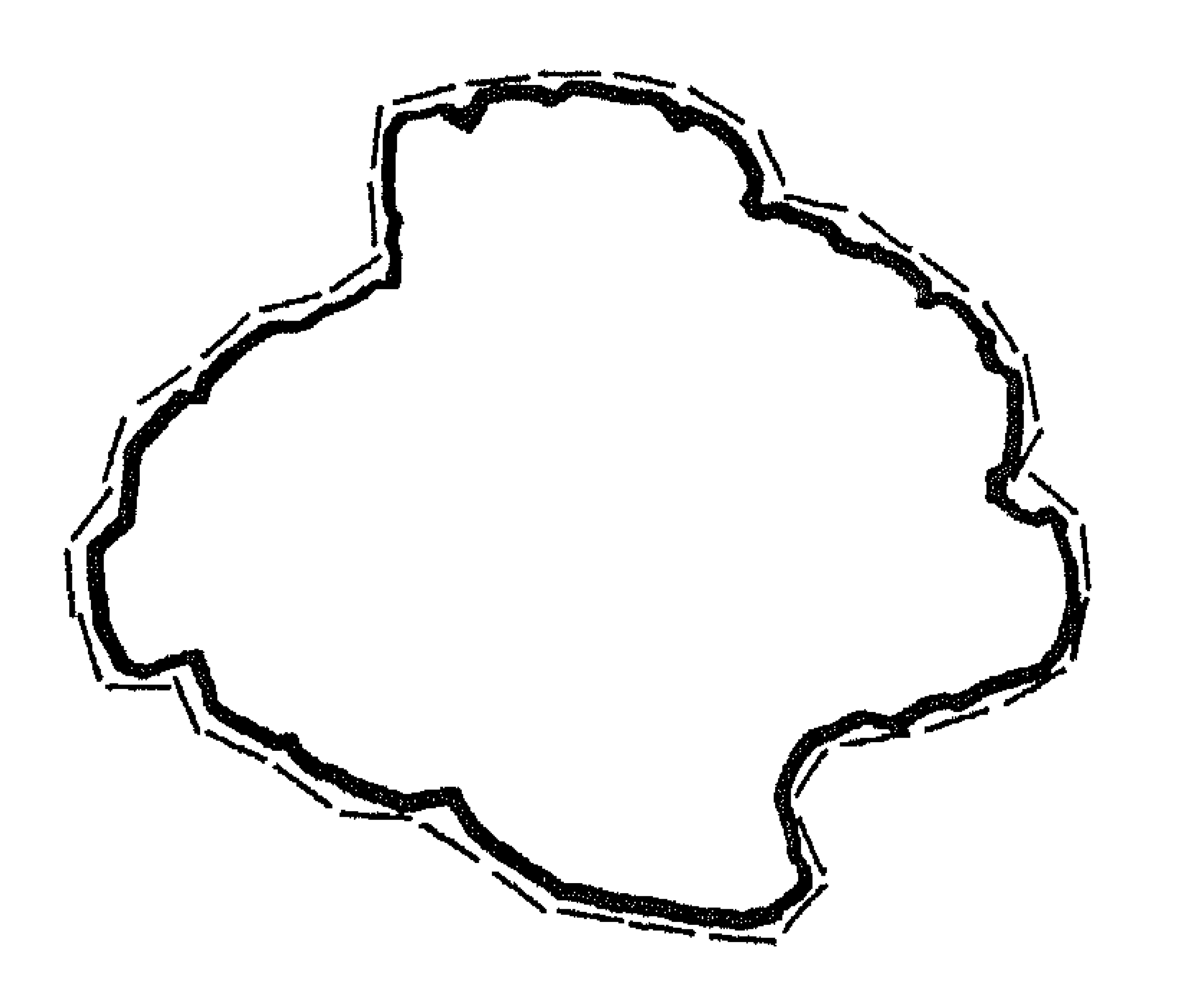
الفصل السابع

أشكال الفراكتال

تحدثنا عن أشكال الفراكتل باختصار فى الفصل السابق، وقد عرفناها بأنها أشكال هندسية تظهر متماثلة على كافة المقاييس. وقد ظهر كل من علم الهيولية وهندسة الفراكتل على استقلال ودون أى ملمح لارتباط بينهما. ولكن تطور الحوادث أنبأ عن وجود رابطة وثيقة بينهما، فمن خلال هندسة الفراكتل يمكن فهم حالة الهيولية بصورة أفضل، فمن المناسب إذن أن ننظر إليهما معا نظرة أكثر دقة.

الشواطئ والمنحنيات

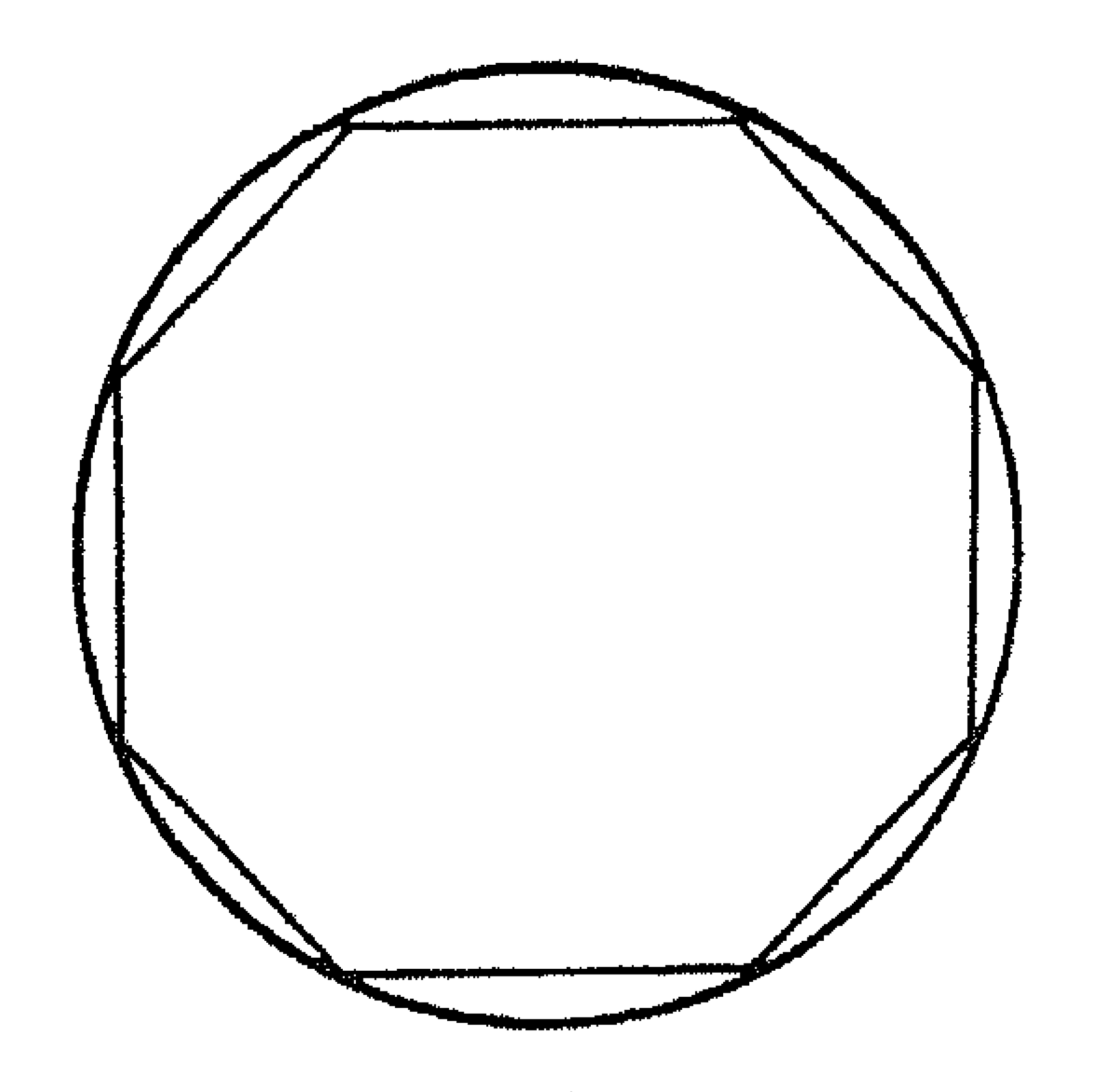
حين تجول ببصرك فيما حولك تلمح العديد من أشكال الفراكتل، فالطبيعة فى الواقع زاخرة بها. ومن أفضل الأمثلة لها شواطئ البحار والمحيطات. فإذا ما نظرت إلى خريطة الشاطئ الغربى للولايات المتحدة مثلا، يبدو لك سلسا إلى حد ما. وحين تنظر إليه من طائرة فسوف تدهش لما به من تعرجات لا تظهر على الخريطة. السبب طبعا أن التفاصيل الدقيقة لا يمكن إظهارها على الخرائط.



جزيرة يقاس محيطها، يتغير المحيط بتغير طول أداة القياس

ولكن حتى من الطائرة لا ترى كافة التفاصيل. فلو أنك قدت سيارتك على طول الشاطئ فسوف ترى الكثير من التفاصيل التى لا تراها من الطائرة، وكلما اقتربت من الشاطئ بدت لك العديد من الخلجان والتعرجات. ففى الشكل الفراكتلى الخالص (الشواطئ ليست أشكالا فراكتلية خالصة، بل تقريب لها) فإن التفاصيل تستمر إلى مالا نهاية كلما توغلت فى تدقيق النظر.

ليست الشواطئ هى الأشكال الفراكتلية الوحيدة فى الطبيعة، فالحدود بين الدول كذلك، وكذلك الأنهار. فإنك إذا تتبعت النهر إلى منبعه ترى أنه مكون من روافد تتغذى من روافد. طبعا لا تستمر العملية للأبد، ولذا فالأنهار بدورها تقريب للأشكال الفراكتلية. ينطبق نفس القول على الأشجار؛ فأنت حين تصعد ببصرك من أسفل الجذع إلى أعلى تشاهد التفرعات، فإذا ما تتبعت فرعا رأيت ما يماثل الشكل الأصلى فى التفرع. كما أن السحب وقمم الجبال هى أشكال فراكتلية.



شكل متعدد الأضلاع داخل دائرة

إن إحدى الخصائص الهامة فى الأشكال الفراكتلية تتضح بالرجوع إلى مثال الشواطئ. لنتخيل أننا أمام جزيرة نريد قياس شاطئها. لكى نأخذ فكرة تقريبية فإننا نستخدم الخريطة، ويكون فيها عادة مقياس الرسم بأسفلها. لنفرض أن الوحدة هى مائة متر، وأننا استخدمنا مسطرة لقياس الساحل، وأننا حصلنا على ٤٧٨٣ مترا. بالنظر إلى الشكل نجد أننا قد تجاوزنا الكثير من الخلجان والتعرجات، وعلى ذلك فإن النتيجة التى وصلنا إليها تقريبية. فإذا ما تصورنا أننا جعلنا وحدة القياس مترا واحدا، فإننا سنحصل على نتيجة أدق، ولتكن ٧٨٤٢ مترا.

فى خطوة ثالثة سوف نجعل وحدة القياس سنتيمترا واحدا، وبذلك سوف نحصل على نتيجة أخرى، ولتكن ١١٣٤٥ مترا. لعلك تتساءل عند هذه النقطة، لو أننا استمررنا بهذه الطريقة، هل سينتهى القياس إلى نتيجة محددة، هى الطول الحقيقى للشاطئ؟ لو كان الساحل شكلا فراكتليا خالصا وأخذنا فى التصغير المتتالى لمقياس الرسم فإننا سوف نحصل على طول لانهائي.

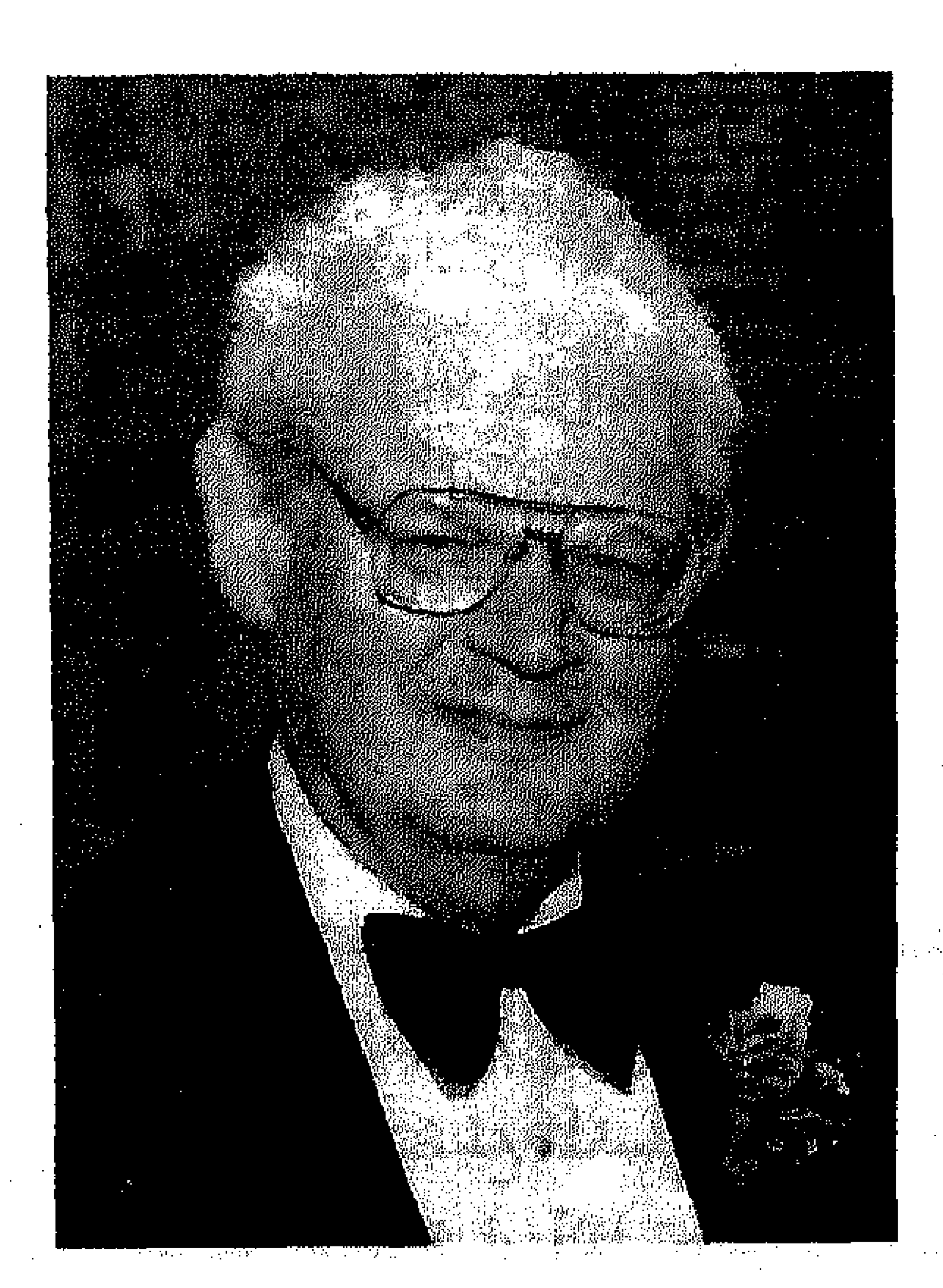
وهى الخصيصة المثيرة للدهشة ليست للمنحنيات الهندسية المعتادة. فلو أننا تصورنا دائرة ورسمنا بداخلها مضلعا، فإن محيطه سوف يكون قريبا من محيط الدائرة بدرجة ما. وإذا ما جعلنا طول ضلع المضلع أصغر، فإن عدد أضلاعه سوف يزيد، ويكون محيطه أقرب لمحيط الدائرة. لو أننا تصورنا الاستمرار فى العملية إلى مالا نهاية، فإننا نقترب تدريجيا من قيمة محددة هى محيط الدائرة.

كيف يمكن للمساحة المحدودة للجزيرة أن تحتوى فى طول لانهائي؟ على غرابة هذه النتيجة فإنها إحدى الخصائص الأساسية للأشكال الفراكتلية. ترى ما مضمون ذلك؟ يعنى ذلك فى المقام الأول أن الهندسة التى درجنا على استخدامها، والتى نطلق عليها الهندسة الإقليدية، ليست صالحة للأشكال الفراكتلية، فنحن فى الواقع محتاجون لنوع جديد من الهندسة.

ماندلبروت

بعد وصول ماندلبروت إلى شركة IBM بقليل فى بداية الخمسينات، لاحظ ظاهرة غريبة، ودهش من كونها شائعة، ورغم ذلك لم يلحظها أحد. بل لم يكن لديه لغة لوصفها. وخلال عام كان فرع جديد لعلم الرياضيات مبنى على تلك الظاهرة قد تشكل فى ذهنه.

ولد بنوا ماندلبروت فى لتوانيا لعائلة يهودية عام ١٩٢٤، وكانت دراسته متقطعة غير مستقرة. وحين بلغ الثانية عشرة ارتحلت عائلته إلى باريس حيث قابل عمه شالوم عالم الرياضيات الذى حبب إليه الاستمرار فى هذا المجال وشجعه على ذلك. ولكن الحرب العالمية الثانية اندلعت فى وقت استعداده للالتحاق بالجامعة، واضطرت العائلة إلى الهرب من باريس إلى جنوب فرنسا.



بنوا ماندلبروت

وبعد نهاية الحرب أدى بنوا امتحان القبول لأهم كليتين فى باريس، الإيكول نورمال والإيكول بوليتكنيك. لم يكن مستعدا بالقدر الكافى لاجتياز الامتحان، ولكنه اعتمد على مقدرته على استخدام المنطق وعلى موهبة خرافية فى استخدام الأشكال فى حل المسائل. وكما كان متوقعا فقد كانت درجاته منخفضة فى الفيزياء والكيمياء ومرتفعة للغاية فى الرياضيات، ومن ثم فقد كان النجاح حليفه.

واختار الإيكول بوليتكنيك، وعلى مدى عدة سنوات ازداد شغفه بالرياضيات. ولكن الغريب أنه كان على الدوام يتحاشى الطريق الجبرى المعتاد، إذ كانت موهبته فائقة على التعامل مع الأشكال، ويعتمد عليها فى معالجة المسائل الرياضية.

فى نهاية الخمسينات رحل إلى الولايات المتحدة، والتحق بمركز أبحاث شركة IBM. كان شابا ممتلئا بالأفكار الجديدة، وكانت الوظيفة التى التحق بها ملائمة له تماما. لقد أعطته فرصة سانحة لإظهار موهبته.

وخلال فترة عمله الأولى فى الشركة عمل فى عدة مجالات مختلفة، وبدا للبعض أنه يقفز من موضوع إلى آخر. لقد اشتغل عدة أشهر بالاقتصاد، ثم هجره ليشتغل بالاتصالات. لم يلاحظ أحد الصلة بين هذه المجالات التى كان يتنقل بينها.

من المسائل التى اهتم بها الشوشرة التى تحدث على خطوط الاتصالات بين الحواسب. كانت تأتى فجائية على غير انتظام، وتمحو بعض البيانات أثناء حدوثها. وقد حاول المهندسون علاجها دون جدوى.

وانتهج ماندلبروت نهجا آخر. لقد حاول فهم طبيعة هذه الشوشرة عن طريق نموذج رياضي، واستخدمه لمعرفة كيفية علاجها. بدأ بتتبع نمط حدوثها، وهو ما لم يفكر فيه أحد من قبل. فالشوشرة تأتى بصورة عشوائية، ولا يعتقد أحد أن هناك فائدة ترتجى من تتبع أوقات حدوثها. لقد توصل ماندلبروت من تحليل بياناتها إلى أنها تضم صورة من التماثل الذاتي.

فئة كانتور

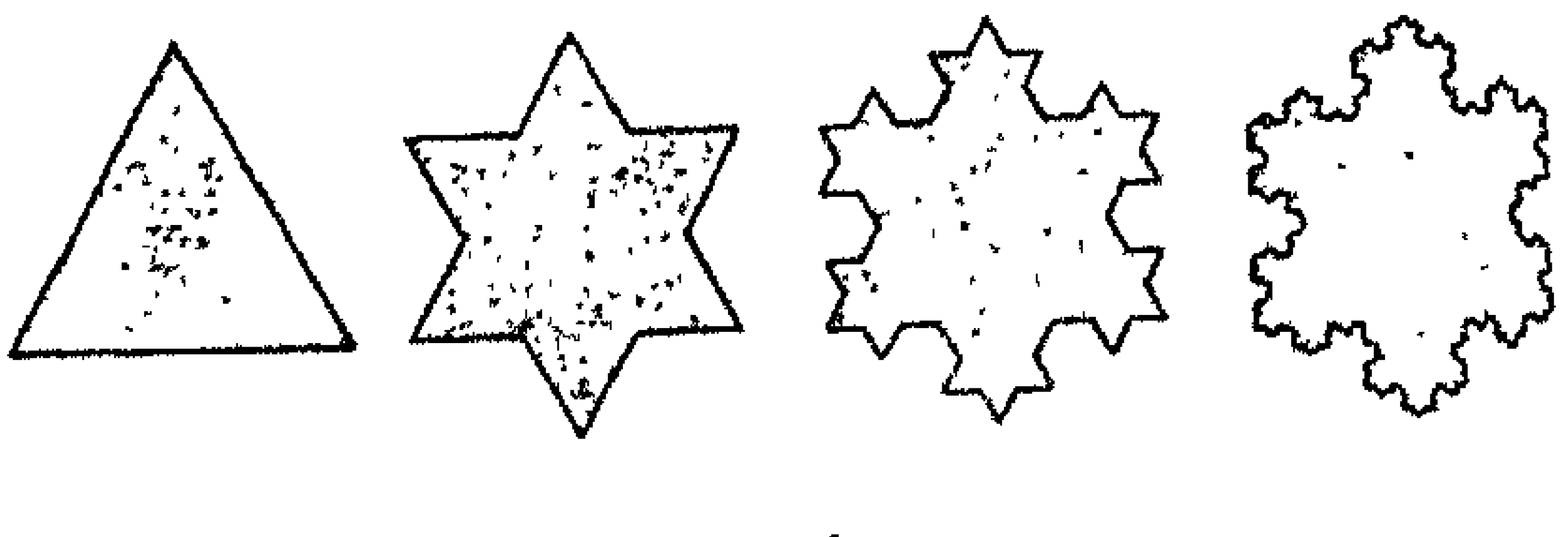
لقد أثار النمط ذكرى شيء درس من قبل، فئة رياضية وضعها عالم رياضيات ألمانى يدعى جورج كانتور George Cantor مسماة باسمه. لقد رسم كانتور خطا وقسمه ثلاثة أقسام، ثم أزال الثلث الأوسط. بعد ذلك قسم كلا من الجزأين الباقيين، ثم أزال الثلث الأوسط من كل منها، وهكذا. لو تصورنا أن العملية استمرت إلى مالا نهاية، فإننا نصل مجموعة من النقاط طولها صفر، وهى التى تسمى فئة كانتور. بالنسبة لماندلبروت فقد وجد أن نمط حدوث الشوشرة يشابه تماما هذه الفئة.

وسرعان ما وجد ماندلبروت أن صفة التماثل الذاتى منتشرة فى أشكال أخرى، وفى عام ١٩٧٥ وضع مصطلح الفراكتال للتعبير عن تلك الأشكال. ومن منطلق اقتناعه بأن الظاهرة عامة أخذ ينشر المقالات حولها، وهو ما قوبل فى البداية بالتجاهل فى الوسط العلمي. ودفعه الإحباط إلى وضع كافة أفكاره عن الموضوع فى كتاب بعنوان "الشكل والصدفة والبعد Form, Chance and Dimension"، ثم تلاه بعد عدة سنوات بكتاب هو تنقيح للأول بعنوان "الهندسة الفراكتلية للطبيعة Fractal Geometry of Nature". وقد حققت هذه الكتب نجاحا باهرا لم تشهده كتب الرياضيات من قبل. كان من أسباب جاذبية هذه الكتب ما تضمه من أشكال مدهشة، وهى أشكال قابلة للتمثيل على الحاسوب مما جذب إليها العديد من هواة الحاسوب.

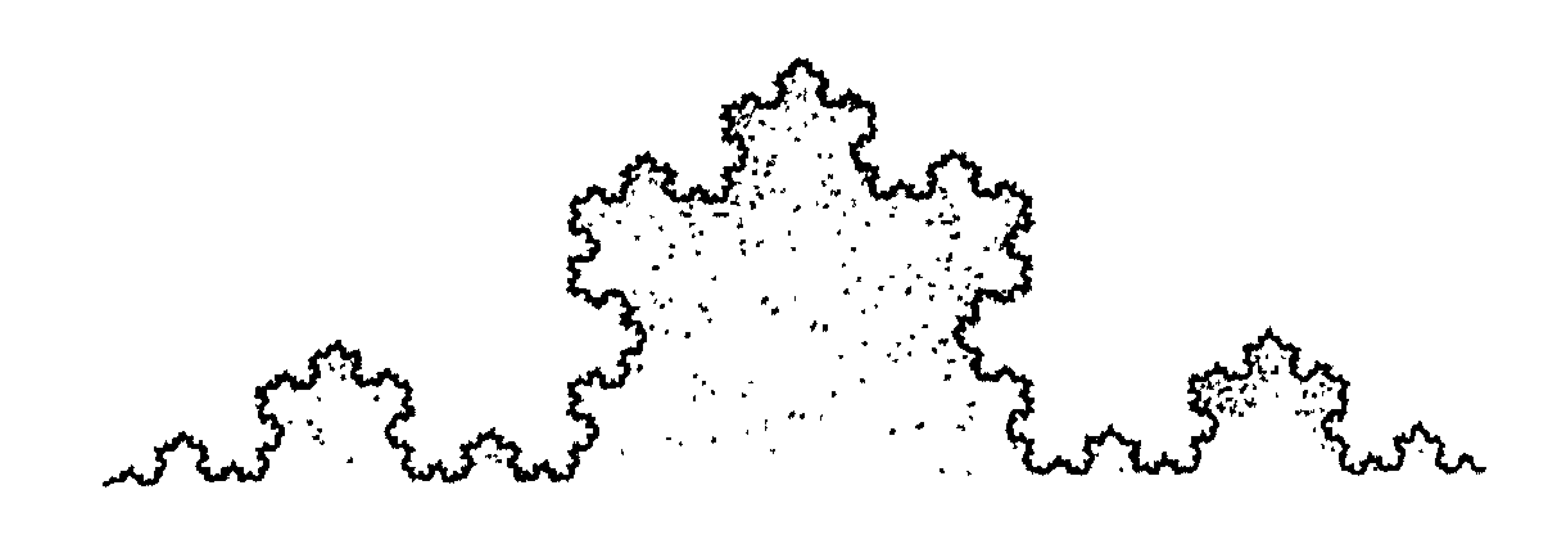
على أن الوسط العلمى استمر على تجاهله لهذا النوع من الهندسة، إذ لم يتحقق ذلك إلا بعد عدة سنوات.

الفركتلات الرياضية

كما قدمنا فإن الطبيعة ممتلئة بأشكال الفراكتل، ولكن علم الرياضيات البحتة يمدنا بطرق آخر لإنتاجها. إن أول من قام بذلك هو الرياضى السويدى هيلج فون كوخ Helge von Koch، إذ وصف عام ١٩٠٤ ما نسميه اليوم كسف كوخ (الكسفة، بكسر الكاف وسكون السين، هى شريحة الثلج الرقيقة). يبدأ إنتاج هذا الشكل الفراكتلى من مثلث متساوى الأضلاع.

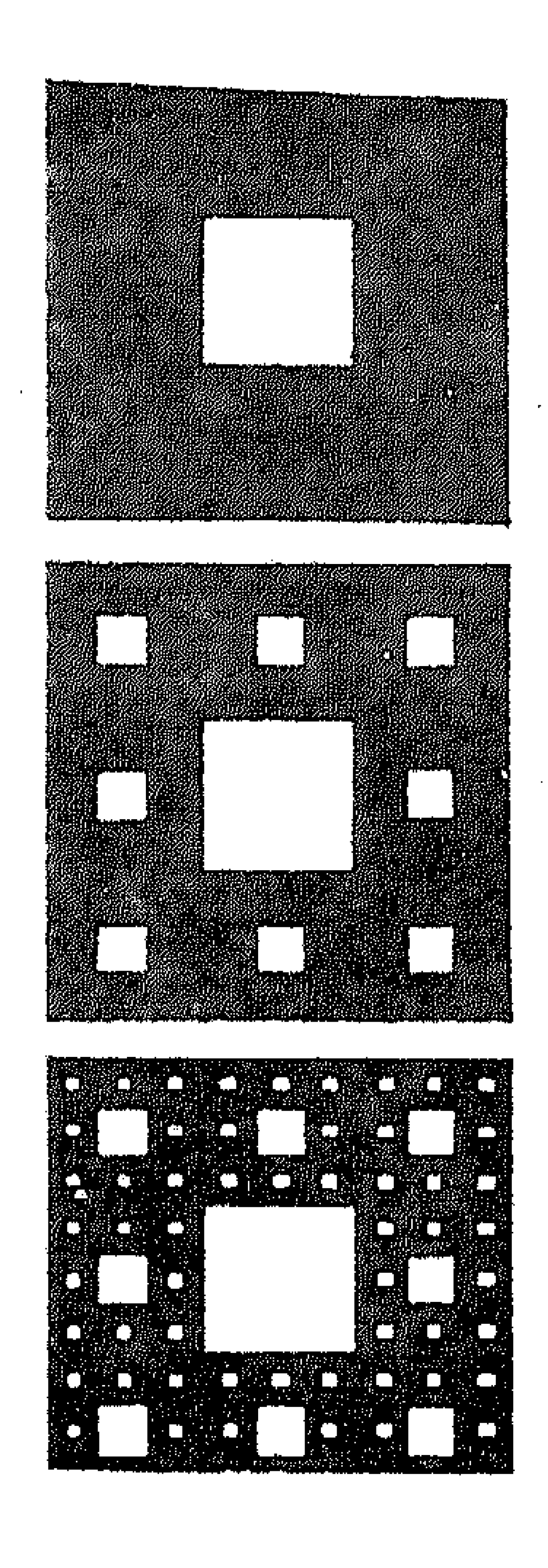


منحنى كوخ



منحنى كوخ، جزء مكبر

كما فعلنا فى فئة كانتور، فإننا نزيل ثلث كل ضلع، ثم ننشئ عليه مثلثا متساوى الأضلاع، طول ضلعه هذه المرة ثلث المثلث الأصلي. وكالعادة، نتابع هذه الخطوات، ثم نتصور الاستمرار إلى مالا نهاية. ينبئنا التحليل الرياضى أن الطول سوف يتزايد إلى مالا نهاية أيضا، وتحصل مرة أخرى على ما يطلق عليه علماء الرياضيات "الأشكال المخيفة"، فهو يتميز هنا بمساحة محدودة محتواة فى خط لانهائى الطول.



سجادة سيربنسكي

يمكن التفكير في إنشاء العديد من هذه الأشكال، منها ما يسمى "سجادة سيربنسكي". نبدأ في هذا الشكل بمربع نقسم كل ضلع ثلاثة أقسام، ثم نقيم عمودا على كل نقطة تقسيم لنحصل على تسعة مربعات، نزيل الأوسط منها، ثم نكرر العمل مع كل مربع متبق. إن لهذا الشكل رياضيا مساحة تساوى الصفر، ويمكن أن تمد الفكرة في الأبعاد الفراغية الثلاثة، فنحصل على ما يسمى "اسفنجة منجر"، وهى شكل فراغى حجمه يساوى الصفر.

هندسة جديدة

كما قدمنا لا تصلح الهندسة الإقليدية التقليدية لمعاجلة أشكال كهذه، فنحن محتاجون في الواقع لهندسة جديدة. إننا حين نتعرض لهذه المهمة تكون نقطة البداية التساؤل عن أبعاد هذه الأشكال. من وجهة نظر الهندسة الإقليدية فالأبعاد لا تزيد عن: صفر للنقطة الهندسية، واحد للخط المستقيم، اثنان للأشكال المسطحة، ثم ثلاثة للأشكال الفراغية. فما الأبعاد المتصورة لشكل فراكتلي؟ لعلنا نتوقع أن يكون لشاطئ البحر أو لمنحنى فون كوخ بعد واحد، فأنت تقيس المسافة على طول خطوط مستقيمة، وهي وحيدة البعد كما قدمنا. ولكن من وجهة نظر أخرى فهذه الأشكال تحتوى في مساحة ما، ومن ثم فيجب النظر إليها على أنها ذات بعدين كالأشكال المسطحة. لهذا السبب فإن لهذه الأشكال في الواقع، ومن وجهة نظر الهندسة الفراكتلية المستحدثة، بعد كسرى يقع بين الواحد الصحيح والاثنين فشكل فون كوخ مثلا له بعد يساوى ١,٢٦١٨,

لعل هذا يبدو فارغا من المنطق. كيف يمكن لشيء أن يكون له بعد كسري؟ على أنك لو فكرت بعمق أكثر لوجدت منطقه، فشكل مثل شاطئ البحر أو منحنى فون كوخ يجب أن يكون له بعد أكثر من الواحد الصحيح، حتى يتميز عن المنحنيات السلسة، كما أنه بداهة لا يمكن أن يكون ذا بعدين، وإلا لأصبح شكلا مساحيا خالصا.

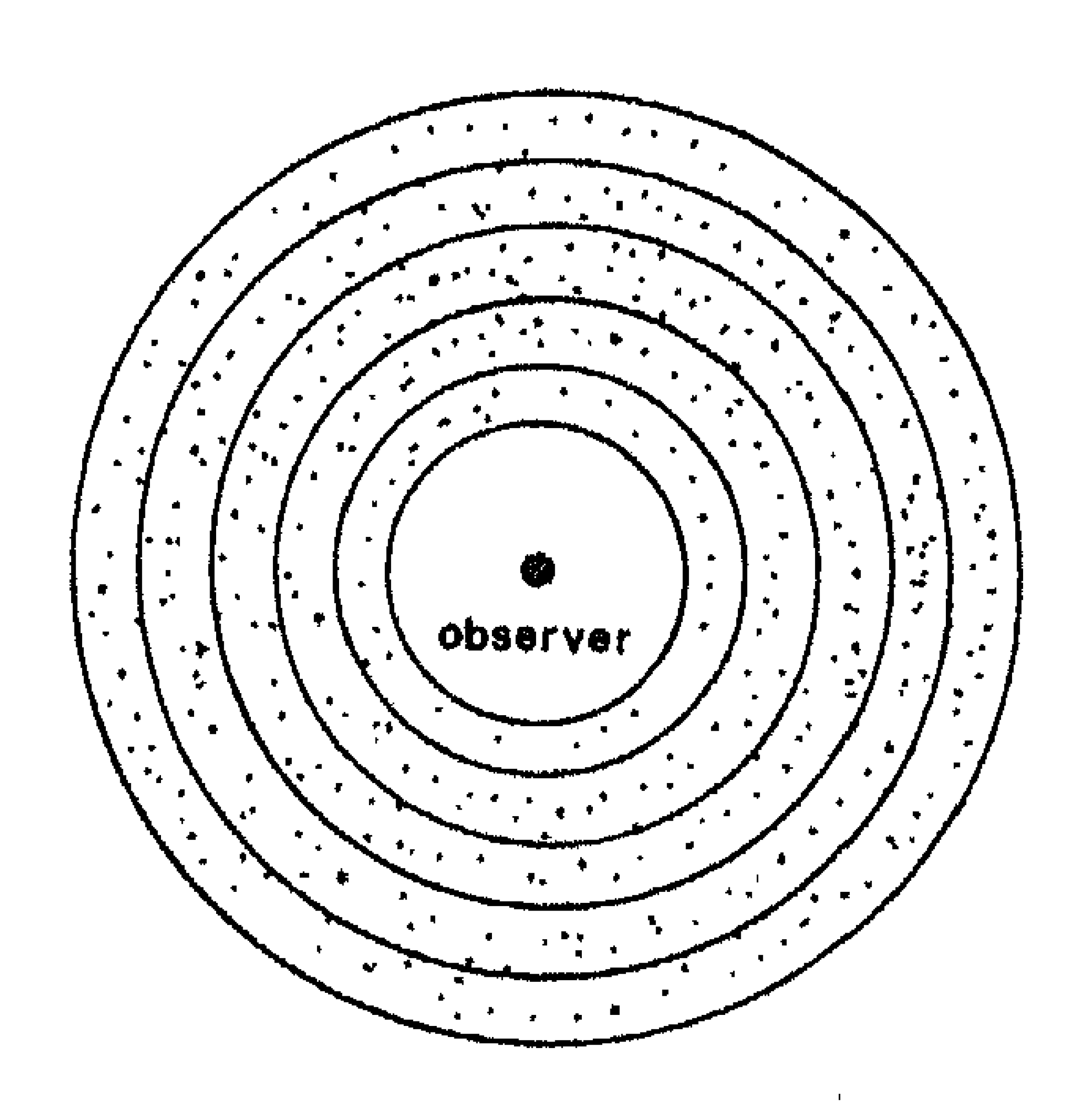
كان إدخال فكرة الأبعاد الكسرية على يد الرياضى الألمانى فليكس هاوسدورف عام ,١٩١٩ ولكن يرجع الفضل لماندلبروت أن سلط عليها الأضواء، مدخلا إياها كدعامة أساسية لهندسته الجديدة. ولم تقتصر حدودها على القيم بين الواحد والإثنين التى للخطوط المتهشمة، بل لأعلى من ذلك، فبينما لحشية سيربنسكى بعد كسرى يساوى ١,٨٩٢٨ مثلا فإن اسفنجة منجر ذات بعد كسرى يساوى ,٢,٧٢٧

ما الذى تخبرنا به هذه الأرقام؟ إذا ما نظرنا إلى بعد شكل فون كوخ الكسري، وهو كما قدمنا ١,٢٦١٨، فإننا نرى أنه أعلى من بعد الخط الهندسى بالقيمة ٢٦١٨٨, ٠، وهذه القيمة هى فى الواقع إشارة لمدى "التهشم" للخط. يعطينا ذلك انطباعا بأن درجة التهشم معتدلة، بالنسبة لشكل آخر له بعد كسرى يساوى ١,٩ مثلا. وحين تنظر للبعد الكسرى لاسفنجة منجر، ترى أن الشكل قريب للغاية من الأبعاد الثلاثة للشكل الفراغى المثالي.

أتذكر حديثنا عن الجاذبات الغريبة؟ لعلك تكون قد تنبأت بصلة لها بموضوعنا هذا. فبينما رأينا أن الجاذبات المعتادة تصور بأشكال هندسية تقليدية، فإن الجاذبات الغريبة ليست منتمية إلى أى شكل تقليدي. إنها فى الواقع أشكال فراكتلية، ولجميعها أبعاد كسرية. إن جاذب لورنز على سبيل المثال له بعد كسرى يساوى ٢,٠٦ بينما لجاذب هينون بعد كسرى يساوى ١,٢٦.

معضلة أولبرز

أدرك ماندلبروت بعد قليل من بحثه فى موضوع الفراكتل أن له أهمية خاصة بالنسبة لعلم الفلك. لقد ثارت قبل ذلك بعدة سنوات معضلة سميت باسم عالم الفلك الألمانى فيلهلم أولبرز Wilhelm Olbers الذى عاش فى القرن التاسع عشر. ولكنها فى الواقع كانت معروفة لسنوات قبل أن يتناولها بالدراسة. كان أول من انتبه إليها هو كبلر. كان السؤال الذى يشغل بال الجميع وقتها هو: هل الكون محدود أم لا حد لاتساعه؟ وهل هو سرمدى بلا بداية؟ لو أن الكون كان بلا حد لاتساعه لضم عددا لانهائيا من النجوم، ولبدت السماء متوهجة بالضوء خلال الليل، وهو ما ليس صحيحا.



معضلة أولبرز

إن وضع المسألة بهذه البساطة لا يجعلها تؤخذ مأخذ الجد. ولكن بمرور الزمن اتضح أنها مشكلة عويصة، لفهمها حق الفهم نتأمل الشكل التالي، الذى يمثل الكون

حول الأرض وقد قسم إلى مناطق كروية متتابعة. نفترض أن النجوم بداخل هذه المناطق موزعة توزيعا منتظما، وأنها ذات إشعاع متساو فى المتوسط:

حيث إن البريق ينخفض بتباعد المسافة بين الأرض والنجوم، فإن النجوم البعيدة تكون أقل بريقا من القريبة. ومن جهة أخرى فإن عدد النجوم المحتواة فى كل منطقة كروية يزداد بسبب ازدياد نصف قطر المنطقة، فيزداد بالتالى الإشعاع الكلى الآتى من منطقة بعيدة عن القريبة.

أمامنا إذن عاملان يلاشى كل منهما الآخر، فتكون النتيجة أن الإشعاع النجمى يأتى متساويا مهما بعدت المناطق الكروية، أى مهما توغلنا فى فضاء الكون. فلو أن الكون كان بلا حدود نهائية، فإن الإشعاع الآتى من الكون فى مجموعه يكون لانهائيا فى شدته، ولبدت السماء متوهجة بالضوء خلال الليل.

كان إدموند هالى هو أول من شد الأنظار لهذه المسألة. فهو قد نشر بحثا عنها عام ١٧٢٠، وأول تحليل لها جاء عام ١٩٠٨ على يد س. شارليه .C. Charlier ولكن مع اكتشاف توسع الكون المطرد علمنا أن النجوم البعيدة يخفت ضوؤها بسبب الانزياح الأحمر، وأنه بالتالى لا يمكن للمناطق البعيدة أن تساهم بنفس القدر فى الإشعاع الضوئى كالقريبة. وقد بين إدوارد هاريسون من جامعة ماساشستس أن هذا لا يحل المشكلة تماما، وأعطى التحليل الأكثر قبولا اليوم. لقد بين أن الكون ليس سرمديا ولا لانهائيا بما يكفى لجعل السماء تتوهج خلال الليل.

إننا حين ننظر للسماء فإننا نرى النجم وقت إشعاعه للضوء، وليس لحظة النظر إليه، أى نراه فى الماضى بالنسبة لنا، وتبين الحسابات أن أبعد منطقة يمكن رؤيتها تقع على بعد ١٠١٠ سنة ضوئية، بعده لا يمكن لنا أن نرى شيئا من الكون.

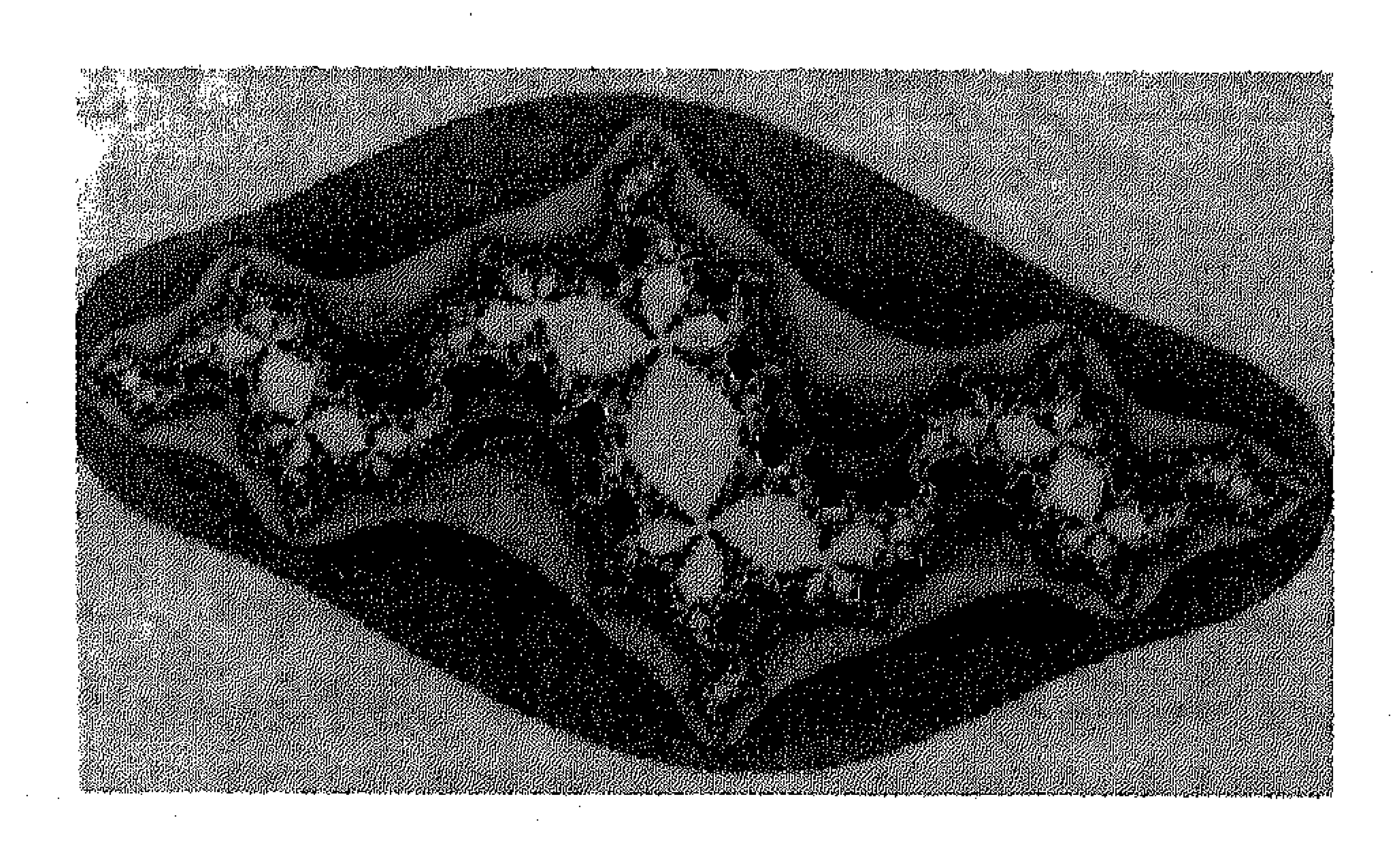
لم يعجب ماندلبروت بهذا التحليل، وفكر فى أن الحل الصحيح لو أن الكون يتمتع بالتماثل الذاتي، بعبارة أخرى لو كانت هندسته فراكتلية. وقد أجريت الأبحاث للتأكد مما لو كان كذلك، وبينت أنه ليس فراكتليا خالصا، ولكنه قريب من ذلك.

فئات جوليا

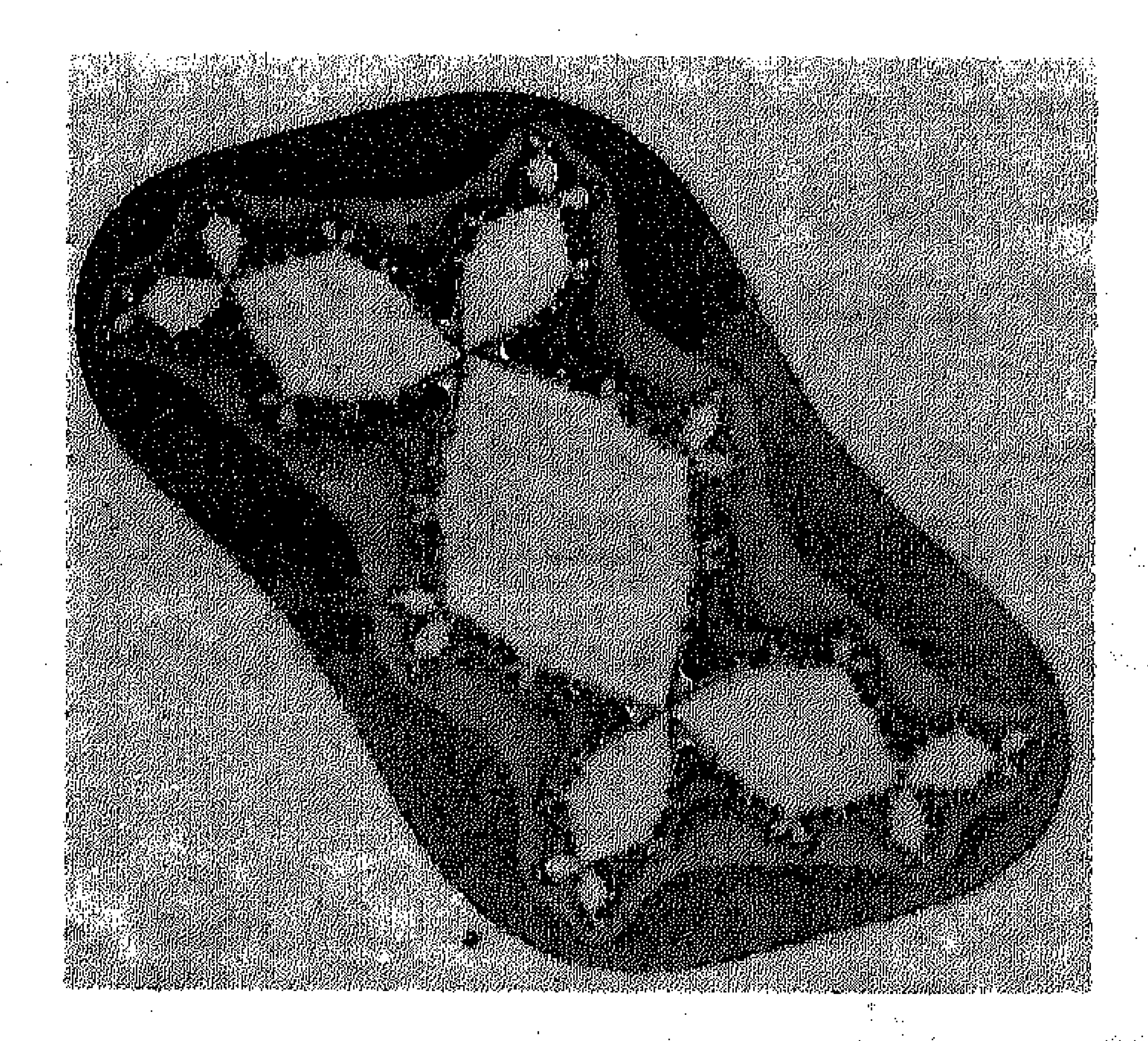
وجه آخر للعلاقة بين أشكال الفراكتل والهيولية يأتى من ثابت فايجناوم. لقد علم عالم الفلك البريطانى ميشيل برنسلى عن هذا العدد عام ١٩٧٩ وشغف به، ترى ما هو

منشؤه؟ كيف يمكن تفسيره؟ كان متأكدا من وجود أمور وراءه لم يكشف عنها بعد، وبعد شيء من تدبر الأمر سر أن وجد شيئا لم يلحظه أحد من قبل. لقد وجد تفسيرا لهذا العدد.

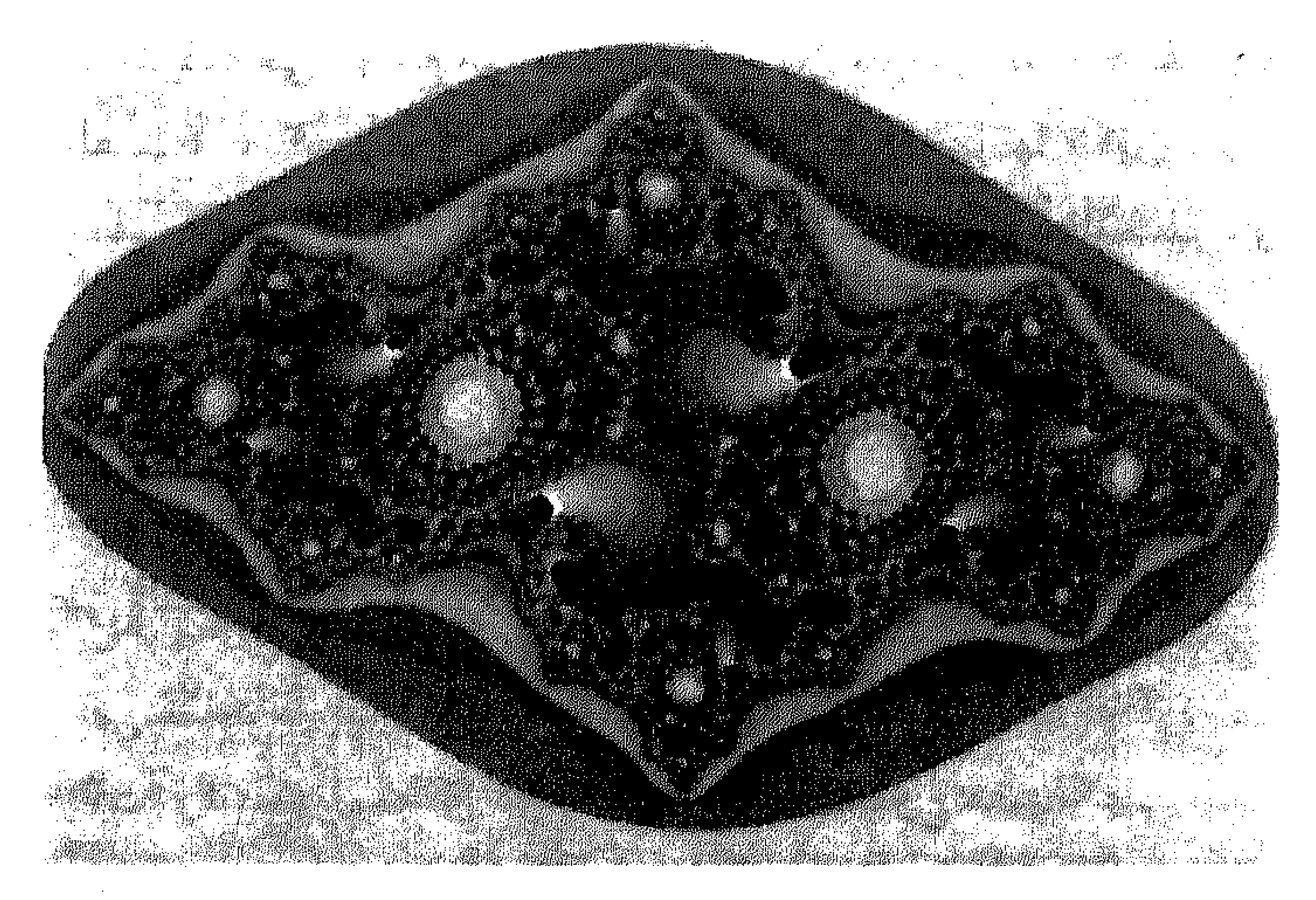
وأرسل بحثا للنشر، ولكن المحرر أخبره أنه لم يأت بجديد، فما توصل إليه كأساس لحله موجود منذ عهد مضى، وبالتحديد منذ عام ١٩١٨ على يد الرياضى الفرنسى جاستون جوليا، ويعرف بالتالى باسم فئات جوليا. أصيب برانسلى بالإحباط، ولكن مجهوده فى الواقع لم يذهب هباء، فقد اكتشف العلاقة بين الهيولية والأشكال الفراكتلية.



شكل من أشكال فئة جوليا



شكل أخر من أشكال فئة جوليا



شكل ثالث من أشكال فئة جوليا

ليس سهلا شرح فئات جوليا دون الرجوع للرياضيات، ولكنى سأحاول أن أجعلها فى أضيق نطاق. إن فئات جوليا تتعامل مع الأعداد التى يطلق عليها الأعداد المركبة، لذلك يجدر أن نبدأ ببيان معناها. إنك تعلم بلا شك معنى الجذر التربيعي، إن العدد الذى يضرب فى نفسه لينتج عددا آخر. والآن لو سألناك عن الجذر التربيعى للعدد ٤، فستجيب على الفور أنه ٢، ولكنك لو سئلت عن الجذر التربيعى للعدد -٤ فلن تجد إجابة، ببساطة لأنه لا يوجد بين الأعداد الطبيعية ما يضرب فى نفسه فينتج عددا سالبا.

لهذا السبب ابتكر علماء الرياضيات نوعا من الأعداد أسموه الأعداد التخيلية، وتميز بالرمز "ت". يقال إذن إن الجذر التربيعى للعدد -٤ هو ٢ت. إن "ت" فى الواقع يعبر عن الجذر التربيعى للعدد -١، والذى ليس له جذر فى العالم الواقعي.

نعلم أيضا أن تمثيل الأعداد الطبيعية يكون على خط مستقيم، ولذا فقد ميز علماء الرياضيات الأعداد التخيلية بأنها ترسم على خط متعامد مع الخط الذى ترسم عليه الأعداد الحقيقية، وعُرفا يؤخذ خط الأعداد الحقيقية على أنه خط أفقي، والأعداد التخيلية على أنه خط رأسي.

الأعداد المركبة فى الواقع هى أعداد تتكون من جزأين، جزء حقيقى وجزء تخيلي، مثال ذلك العدد ٢ + ٣ت. حين توقع هذه الأعداد بيانيا، فإنها تكون على مسطح ذى إحداثيين، أفقى لتوقيع الجزء الحقيقي، ورأسى لتوقيع الجزء التخيلي، ويمثل العدد بتقاطع الإحداثيين كما فى مستوى الإحداثيات المعتاد.

وتجرى كافة العمليات الحسابية على الأعداد المركبة كما تجرى على الأعداد الحقيقية سواء بسواء، ففى حالة الجمع مثلا يجمع الجزء الحقيقى على الحقيقي، والتخيلى على التخيلي، ثم يحسب الناتج النهائى للعملية.

نعود إلى فئات جوليا. كيف نحصل عليها؟ لنفترض أننا اخترنا عددا مركبا، (ليكن ٣ + ٣ت، وللتسهيل نطلق عليه "ك"). سوف نصوغ معادلة على الصورة: ك١ = ك٢ + س، حيث س هو عدد مركب ثابت، و ك١ هى القيمة الناتجة من جمع العدد ك٢ (حاصل ضرب العدد ك فى نفسه) على العدد س.

لنفرض أننا نكرر الخطوة السابقة باستمرار، كل ناتج من خطوة يعوض عنه فى نفس المعادلة مرة أخرى. يعتمد على اختيارك المبدئى للعدد "ك" كون النتائج متقاربة أم متباعدة، بمعنى أن الخطوات سوف تنتج أعدادا تتزايد إلى مالا نهاية، أم تتناقص إلى عدد محدد. إن فئات جوليا هى فى الواقع الحدود بين المجموعتين، تلك التى تؤدى للتباعد والتى تؤدى للتقارب.

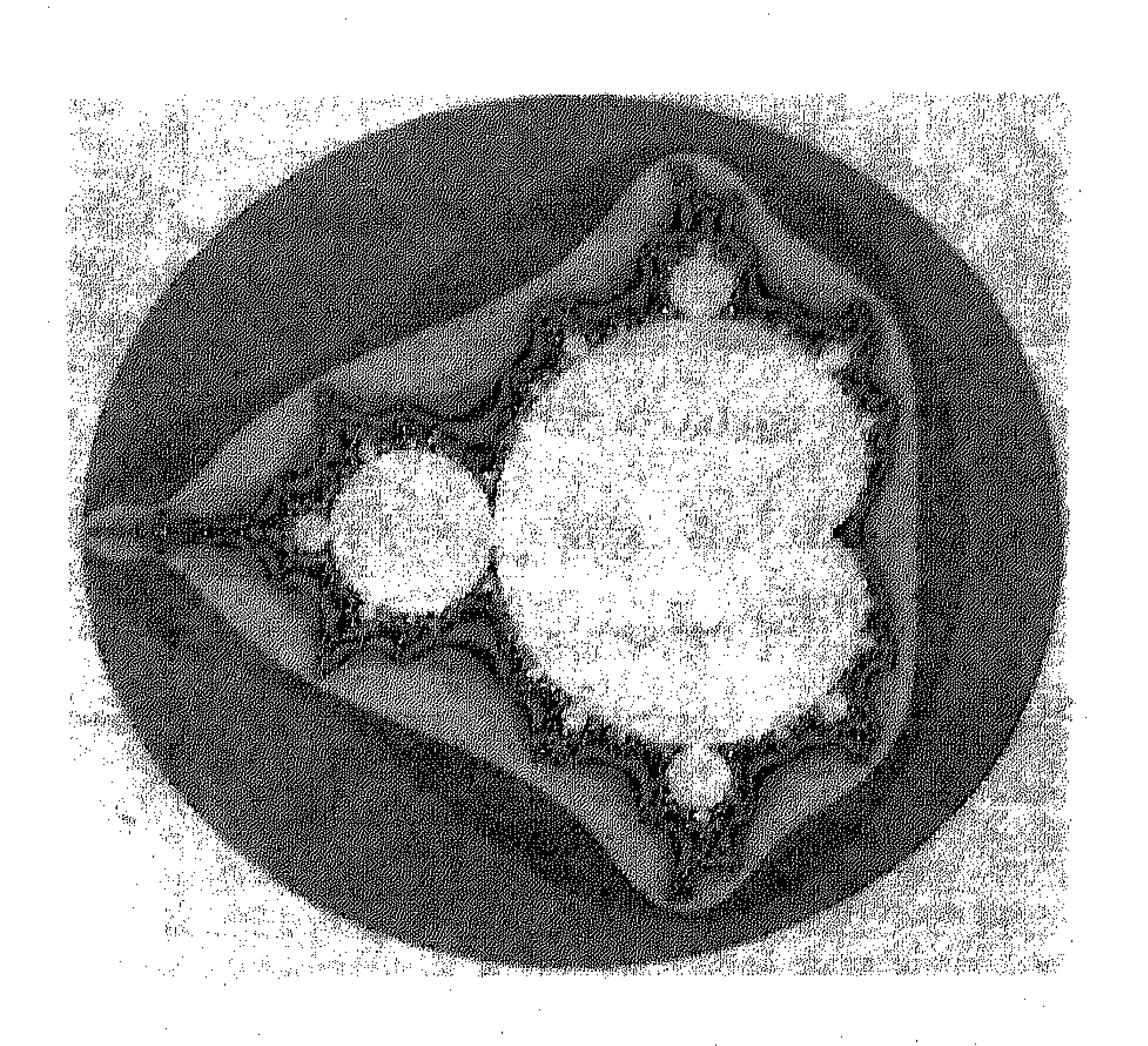
تبين الأشكال المعطاة عددا من الأمثلة لفئات جوليا. لنختر الحالة الخاصة حيث س = صفر، وهى أسهل الحالات. إن النتائج تتقارب فيها لو كان ك أقل من ١، وتتباعد لو أنها أكبر من ١. إن فئة جوليا تكون بذلك دائرة مركزها الأصل ونصف قطرها هو ١. وباللغة التى درجنا على استخدامها نقول إن الدائرة هى "حوض" يجذب إلى جاذب ذى نقطة ثابتة هى نقطة الأصل.

إذا ما غيرت من "س" تغييرا طفيفا، فإنك تحصل على منطقة مشوهة، ولكنها متصلة لا يكون فيها الجاذب هو نقطة الأصل. وبإعطاء الثابت "س" قيما متزايدة فإنك تجد أن هذه المنطقة تتجزأ إلى مناطق أصغر على صورة جزر، لكل منها جاذب بداخلها، وحين نصل إلى قيم كبيرة لـ "س"، فإن الجزر تنفصل عن بعضها.

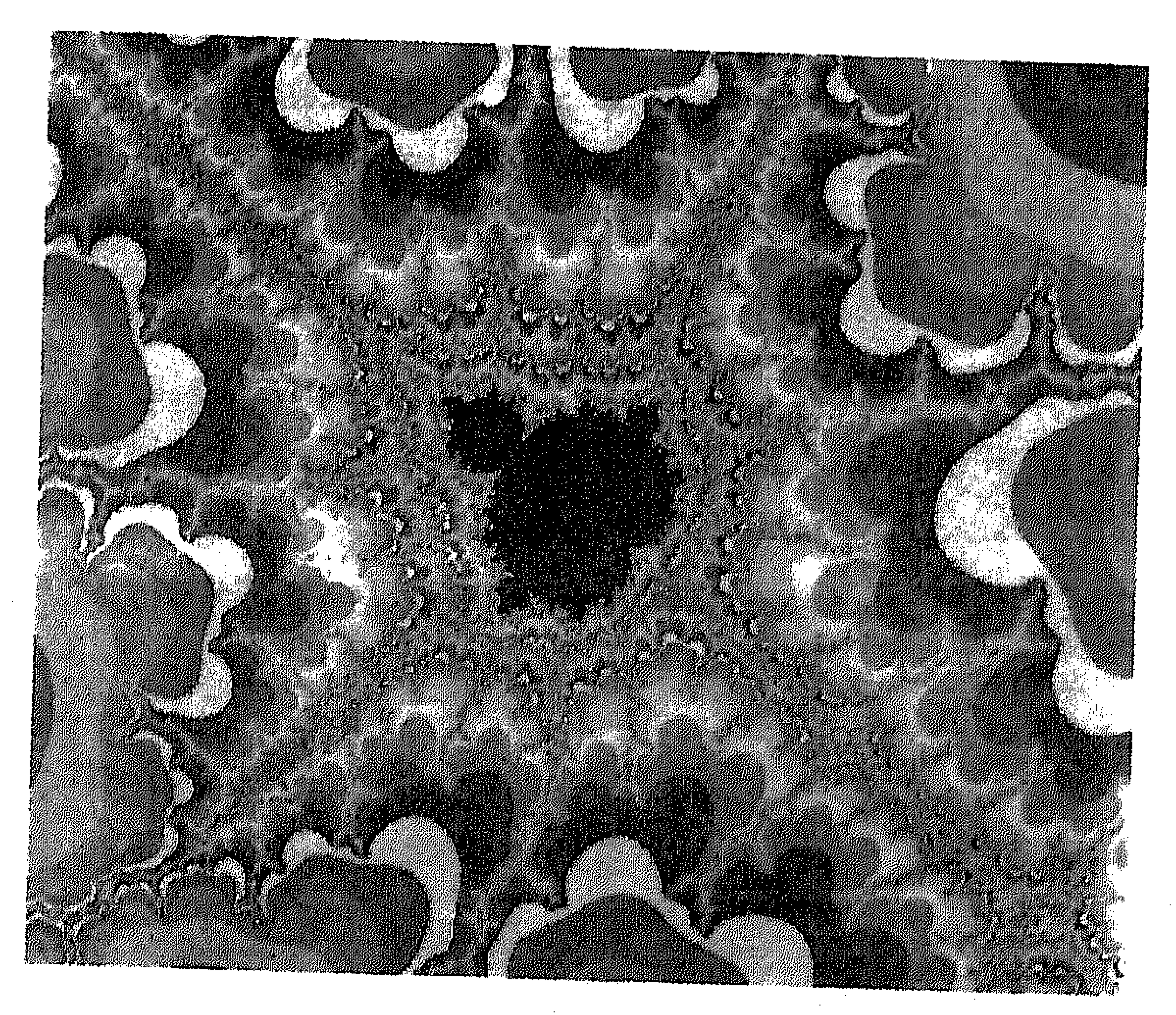
أعقد شيء في الرياضيات

شغف ماندلبروت بفئات جواليا فى نهاية السبعينات، ففى عام ١٩٧٩ حصل على إجازة من شركته وذهب إلى جامعة هارفارد كأستاذ زائر، حيث استغل حاسوبها طراز VAX فى دراسة فئات جوليا. كانت فكرته عن أشكال الفراكتل قد تشكلت تماما، وكان يريد أن يبحث عن أية صلة بينها وبين فئات جوليا. لقد سبق له أن درسها فى فرنسا، وهو بذلك على دراية تامة بها منذ أن كان فى العشرينات من عمره، ولكنه لم يفكر فيها منذ ذلك العهد.

بعد أن بحث الموضوع باستفاضة، وجد ما فيها من جدة، وفكر فى اختبار شيء شبيه وإن كان أكثر تعقيدا. كان معتقدا أن معادلة بسيطة كتلك التى وضعها جوليا لفئاته لا يمكن أن تنبئ عن معلومات غزيرة، ولكنه بعد أن بحث عدة معادلات أبسط عاد إلى نفس المعادلة، ولكنه عالجها من وجهة نظر أخرى.

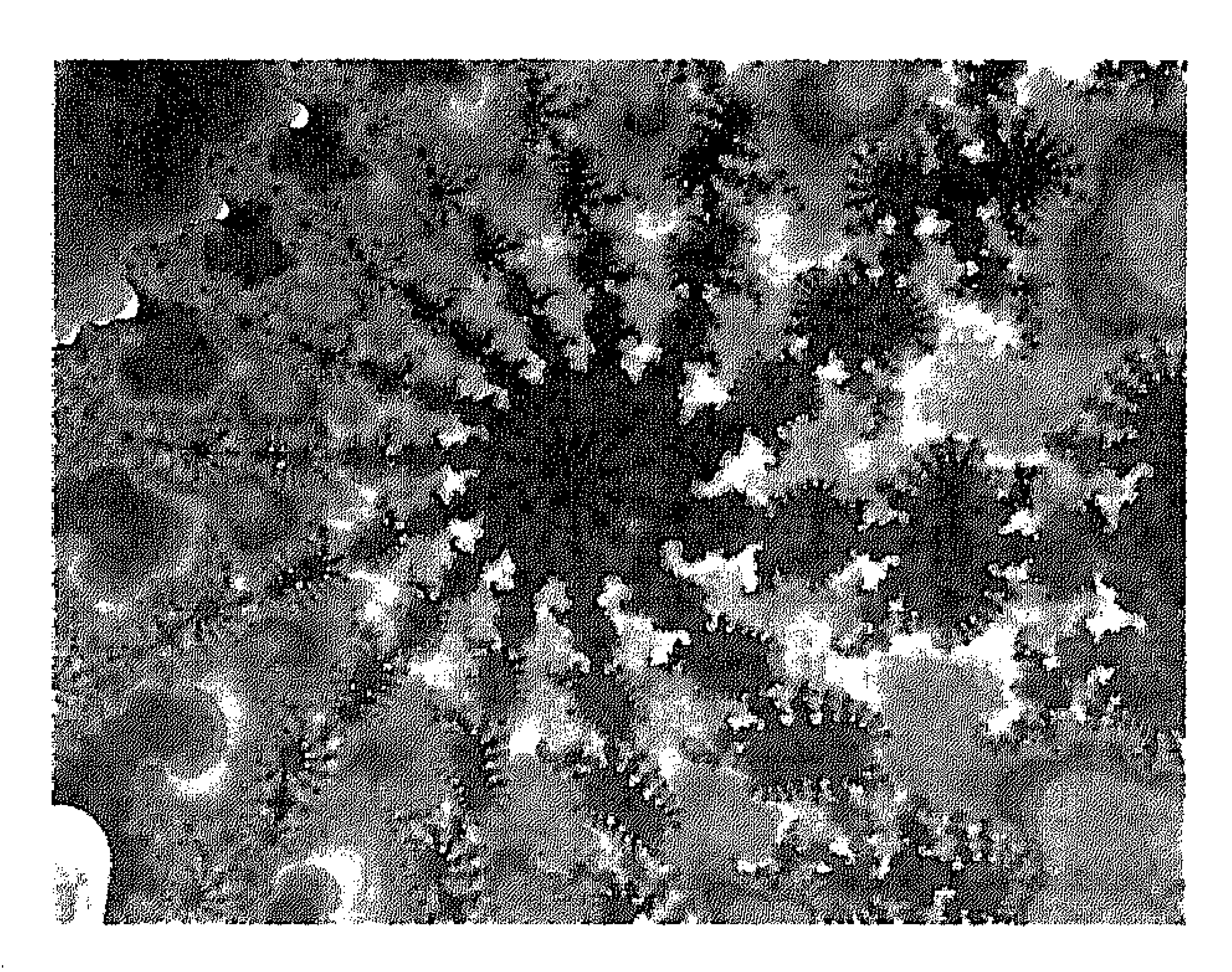


الشكل النمطي لفئة ماندلبروت، لاحظ رجل الثلج في المنتصف



جزء مكبر من شكل فئة ماندلبروت

لننظر إلى المعادلة: ك ١ = ك + س. سوف نبدأ بقيمة معينة للعدد "ك"، وليكن الصفر، ثم نغير من قيم "س". ستجد أنه لبعض قيم هذا العدد تتباعد قيمة المعادلة إلى مالا نهاية، ولبعضها الآخر تتقارب إلى قيمة محددة. حصل ماندلبروت على شكل غاية فى الإثارة، أشبه برجل ثلج راقد على جنبه، مع تفرعات متشابكة معه.



جزء مكبر من شكل فئة ماندلبروت



جزء مكبر من شكل فئة ماندلبروت

وبدأ فى تفحص جزء من الشكل بدرجة أكبر، فلم يحصل إلا على أشكال مشوشة لا تنبئ عن شيء محدد، فهرع إلى شركته حيث الحواسب أقوى بمراحل. وبالفعل وجد أن الصورة تزداد تعقيدا بدرجة لا تتصور.

ماذا يعنى ذلك؟ بدأ ماندلبروت يتفحص الشكل الجديد. كلما تفحص الشكل بدقة أكبر تفجرت أشكال أكثر غرابة. وجد ماندلبروت أن الشكل يحوز خاصية التماثل الذاتي، ومن ثم فهو شكل فراكتلي، ولكنه لم يكن فراكتليا بالمعنى المقصود فى شكل فون كوخ. بمعنى آخر، لم يكن التماثل تاما. فمع زيادة التكبير تمخض الشكل عن كافة ما يتخيل من أشكال غريبة: شطآن ولفائف ولوالب من كافة الأنواع. كان شيئا مثيرا بكل المعاني، وأشد ما فيه من غرابة أن زيادة التكبير لا تفتأ تخرج أشياء مشابهة على مستوى أصغر من مقياس الرسم. فرجل الثلج الراقد على جنبه يبدو مدفونا فى كل نمط يخرج.

إن وجه الغرابة فى الأمر أن يتمخض كل هذا التعقد من معادلة بمثل تلك البساطة. إن كل ما هو مطلوب لا يزيد عن عشرة أسطر لبرنامج الحاسوب، ولكنك لو أردت تخزين ما يخرج عنه فربما لن تكون ذاكرة الحاسوب كافية.

واكتشف ماندلبروت أيضا أن إعجابه بفئات جوليا كانت متضمنة فى هذه الأشكال، التى يطلق عليها فئة ماندلبروت. فمع المزيد من اختبار الفئة تجد أشكالا تنتمى إلى فئات جوليا تتناثر من الشكل الأصلي.

وقام عالم الرياضيات اليابانى متسوهيرو شيشيكورا Mitsuhiro Shishikura عام ١٩٩١ بحساب بعد فئة ماندلبروت، فوجده ٢, وقد يبدو عجيبا أن يكون لشكل فراكتلى بعد صحيح وليس كسريا، ولكن إذا تذكرت أن بعد الشكل الفراكتلى يعبر عن مدى تعقده، وأنه يقع دائما بين ١ و ٢، فإن معنى ذلك أن فئة ماندلبروت تحتل أقصى درجة من التعقد، ولذلك يطلق على هذه الفئة صفة أنها أعقد شيء فى الرياضيات.

الحاسوب والفراكتلات والإبداع الخيالى

حين تقلب صفحات كتاب حديث عن أشكال الفراكتال تجده زاخرا بأشكال تشبه الكواكب أو الأقمار أو حتى المناظر الأرضية، ولكن كل هذه الصور ليست حقيقية بالمرة. فإنك لو أردت تخزين معلومات عن جزء حقيقى من سطح القمر لاحتجت إلى

مساحة هائلة من الذاكرة. ولكن تخزين الرسومات فى الحاسوب باستخدام أسلوب الفراكتل يتيح قدرا هائلا من الإبداع فى عالم الخيال دون التعرض لهذه الصعوبة، وهو الأسلوب المستخدم بالفعل فى الأفلام والكتب.

لقد رأينا أنه بواسطة برنامج حاسوبى مختصر يمكننا أن ننتج أشكالا غاية فى الإثارة، قد يكون مستحيلا تخزينها كأشكال رسومية بشكل مباشر. وتتلخص فكرة هذا الأسلوب على فكرة التكرار، وهو أمر يتفوق فيه الحاسوب أيما تفوق، فهو لا يعجزه أن يقوم بتكرار عملية ملايين المرات فى دقائق. ولكن من أين تأتى الأشكال الفراكتلية؟ إنها تتمخض فى نسخ أصغر وأصغر من ذاتها، ومن هذه النسخ يمكن بناء ما يشاء المبدع من خيالات.

طريقة نيوتن

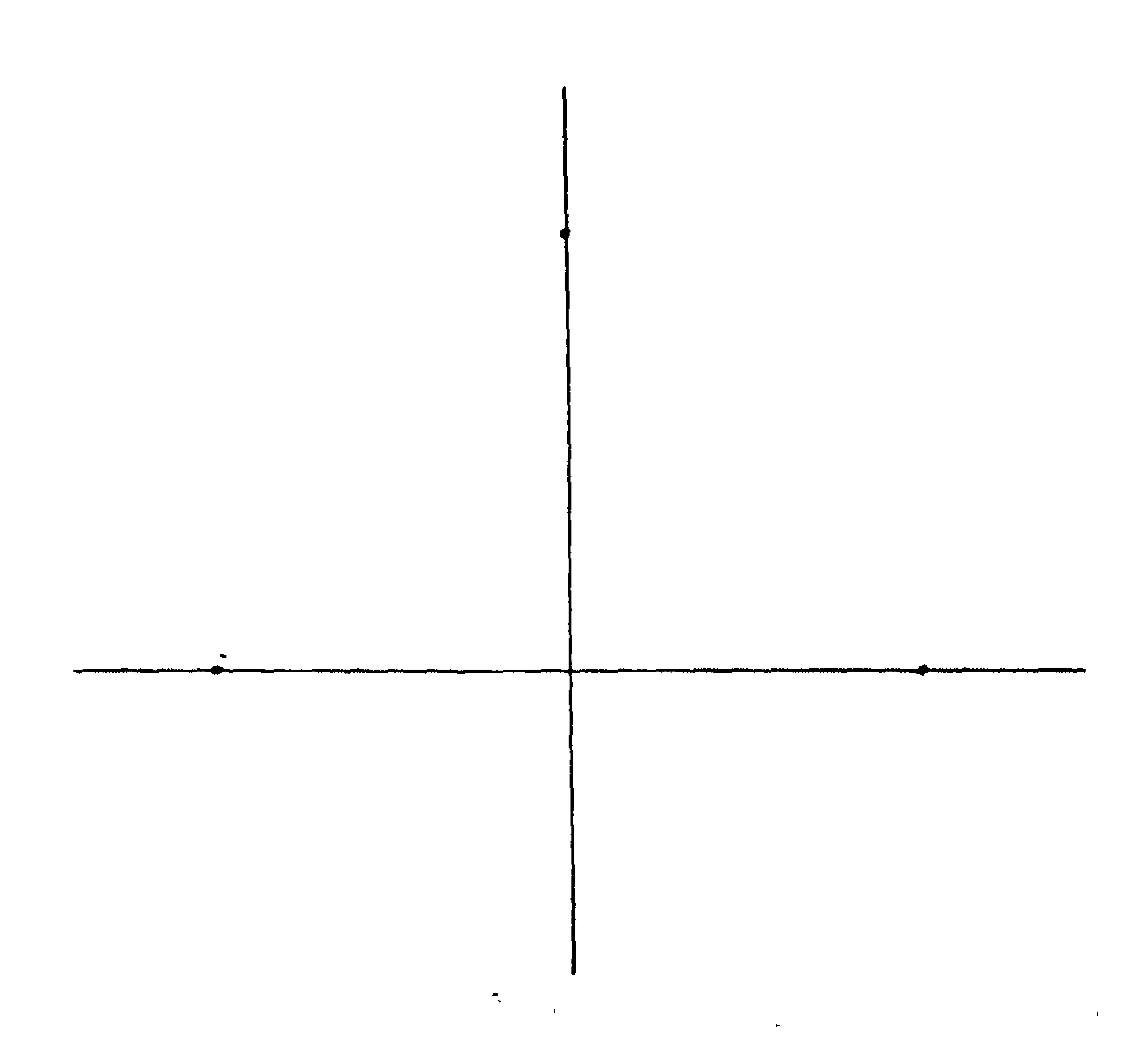
يحدث مرارا وتكرارا أن تستخرج من تراث العلم طرق قديمة لتعطى ثوبا جديدا. هذا ما حدث لطريقة نيوتن فى حل المعادلات متعددة الحدود. ويدل اسمها المنسوب لنيوتن على قدم عهدها. ولكنها رغم ذلك طريقة مفيدة فى حل المعادلات، تعتمد على التكرار، وهو ما يمكن أن يعطينا لمحة معينة، ففئات جوليا وفئة ماندلبروت يعتمدان أيضا على التكرار.

تدخل طريقة نيوتن المنهج الدراسى فى مرحلة ما قبل التخرج، وتتطلب منك أن تقوم بتخمين مبدئي. واعتمادا على هذا التخمين يمكنك أن تنقح منه، فتقترب أكثر وأكثر من الحل الصحيح.

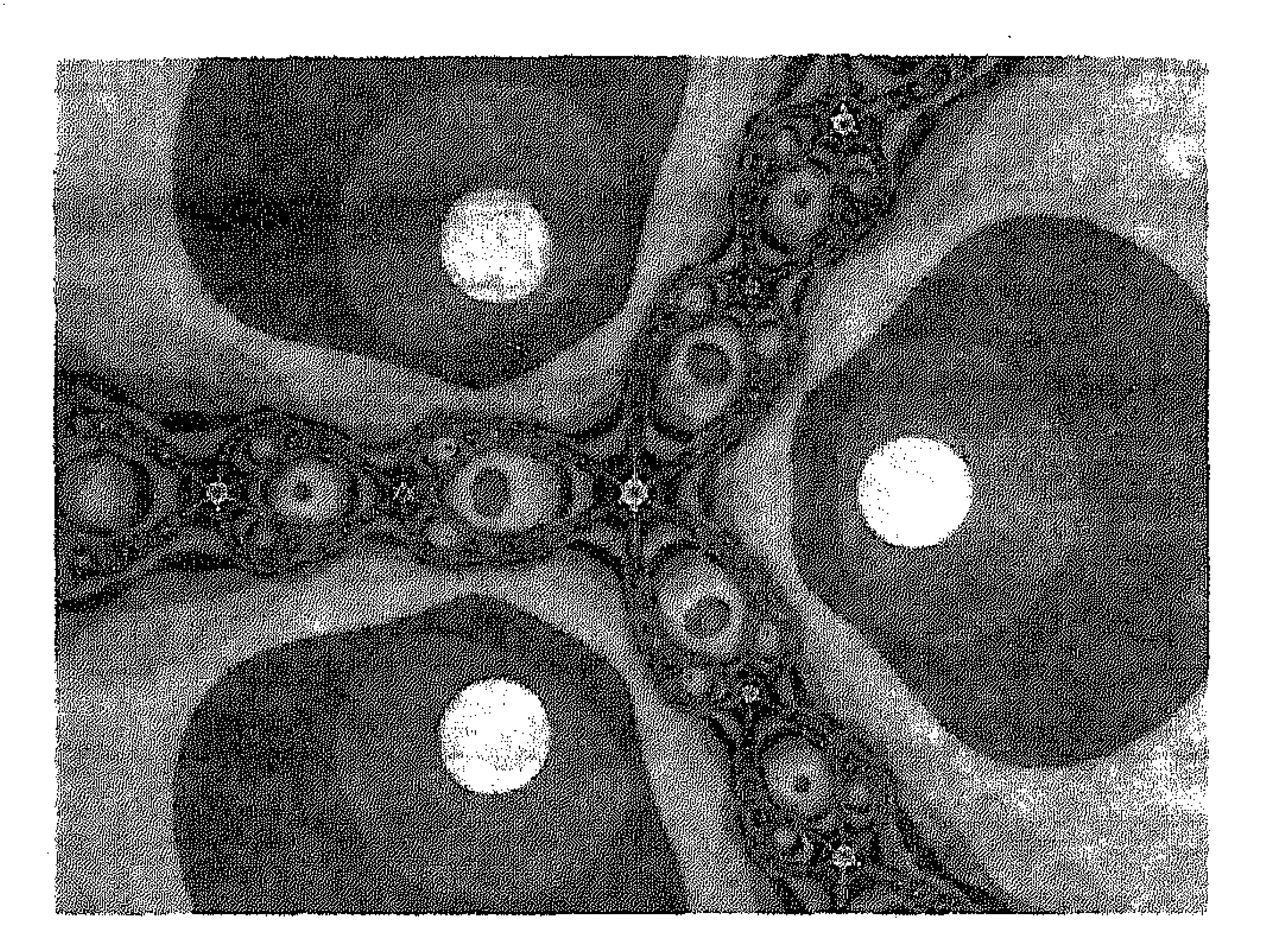
وحتى يمكننا أن نخوض فى الموضوع بتفاصيل أكثر، لنعد إلى تمثيل الأعداد المركبة. إن معادلة من الدرجة الثالثة يكون لها عادة ثلاثة حلول، توقع ثلاث نقاط على مستوى الإحداثيات. والهدف هو إيجاد النقاط الثلاثة التى تمثل الحل الصحيح.

ابدأ بتخمين ما. إذا كان هذا التخمين قريبا من أحد الحلول الثلاثة فإن طريقة نيوتن تأخذك إليه بعد عدد قليل من التكرار. ولكن ماذا لو أنك خمنت قيمة تقع بالضبط بين حلين؟ لقد اهتم الرياضى الأمريكى جون هابارد بهذه المسألة فى السبعينات. قام هابارد بدراسة منطقة الحدود بين الحلول، مستخدما الحاسوب. لعلك تلاحظ أن لدينا ثلاثة أحواض، لكل حوض جاذب ذو نقطة جذب (أحد الحلول الصحيحة). إن المتصور

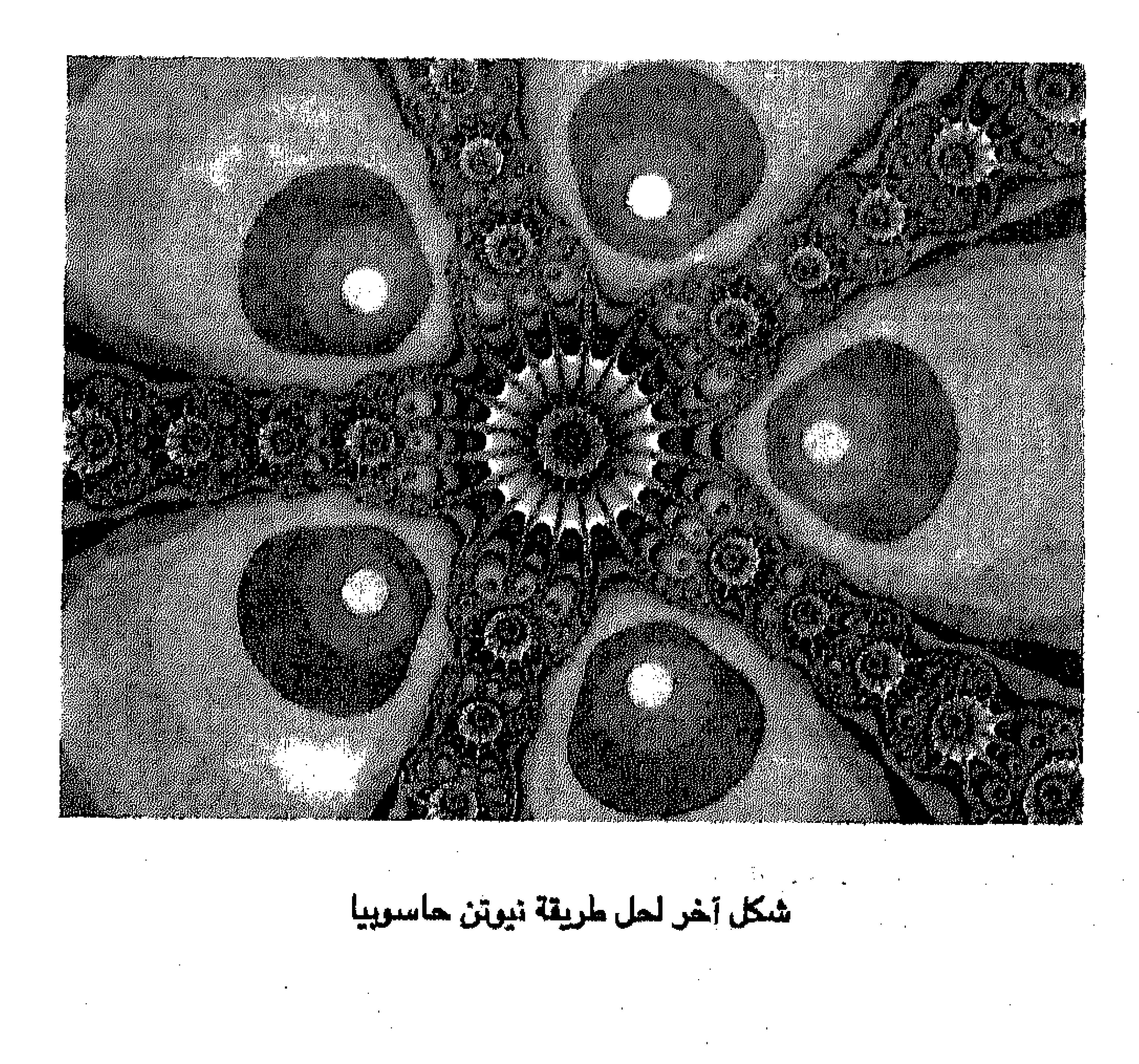
أن تكون الحدود بين الأحواض (مناطق الحلول) قاطعة، أى خطوط معتادة. ولكن ما وجده هابارد كان أمرا لا يخطر على بال قط. لقد وجد أن المنطقة المشتركة بين أى حلين معقدة بشكل غير متصور، فهى على هيئة فراكتلية. فإذا ما اخترت نقطة قريبة من أحد الحدود وجدت التكرار يعطيك نتائج تتراقص عشوائيا قبل أن تتقارب لأحد الحلول. أما عند الحد مباشرة فقد يطول التكرار إلى ما لا نهاية. قام هابارد بإعطاء كل مجموعة تؤدى لحل معين لونا خاصا، فإذا به يحصل على أشكال غاية فى الإبهار.



طريقة نيوتن لحل المعادلات متعددة الحدود



حل حاسوبي لطريقة نيوتن



شكل آخر لحل طريقة نيوتن حاسوبيا

استعرضنا فى هذا الفصل الطرق المتعددة التى تنتج بها الأشكال الفراكتلية، وكيف تكون على هيئات مختلفة. ومع تقدم تقنية الحواسب يزداد الاهتمام بهذه الأشكال، وبالنسبة لنا فإنها مهمة لارتباطها بالجاذبات العجيبة للحالات الهيولية.

بهذا ننهى استعراضنا لأساسيات علم الهيولية، وبهذه الخلفية يمكننا أن نطبق هذا العلم فى مجال أرحب، مجال علم الفلك.

الفصل الثامن

الهيولية فى النظام الشمسى - مقدمة

فى بحثنا عن الهيولية فى الكون، فإن نقطة البداية المنطقية تكون نظامنا الشمسي. لقد ذكرنا فى موضع سابق احتمال أن تلعب الهيولية دورا هاما فى مدارات الكواكب، وأن بوانكريه فى بداية القرن قد صادف حالة الهيولية خلال دراسته لاستقرار النظام الشمسى على المدى الطويل. لقد كان الحل معروفا لنظام ذى جرمين، ولكنه حين أضاف جرما ثالثا دهش لدى ما صارت إليه المسألة من تعقد، وقد انتهى إلى أن مثل هذه المسألة ليس لها حل جبري. ولكن بوانكريه لم يكن ممن يسلمون بالهزيمة بسهولة، فحاول الالتفاف حول المسألة باللجوء لطريق الرسم عن طريق توقيع المدارات فى فضاء الطور، ثم درس مقطعا من المسار، وهنا تمخضت العملية عن الهيولية.

لقد أحبط اكتشاف بوانكريه الكثير من العلماء، فقد كان هذا يعنى عدم جدوى الاستمرار فى بحث المسألة. ولكن منهم واصل دراستها، رغم أن القليل من كان يرى ضوءا مرشدا له. لقد كانت المسألة عصية على الحل المباشر، ولكنها قابلة للتقريب باستخدام أسلوب الاضطرابات. لقد تحين هذا الأسلوب كثيرا على مدى السنين، إلى أن تمكن الفلكيون من الوصول إلى حلول بدقة مقبولة.

ولكن المشكلة كانت تكمن فى مدى الإرهاق عند إجراء الحسابات، للوصول إلى الدقة المطلوبة. فالقليل من الناس من يقبل أن ينخرط فى حسابات روتينية قد تطول لشهور أو لسنوات، خاصة أن الكثير من النتائج كانت موضع شك بسبب عملية التقريب.

نظرية كام

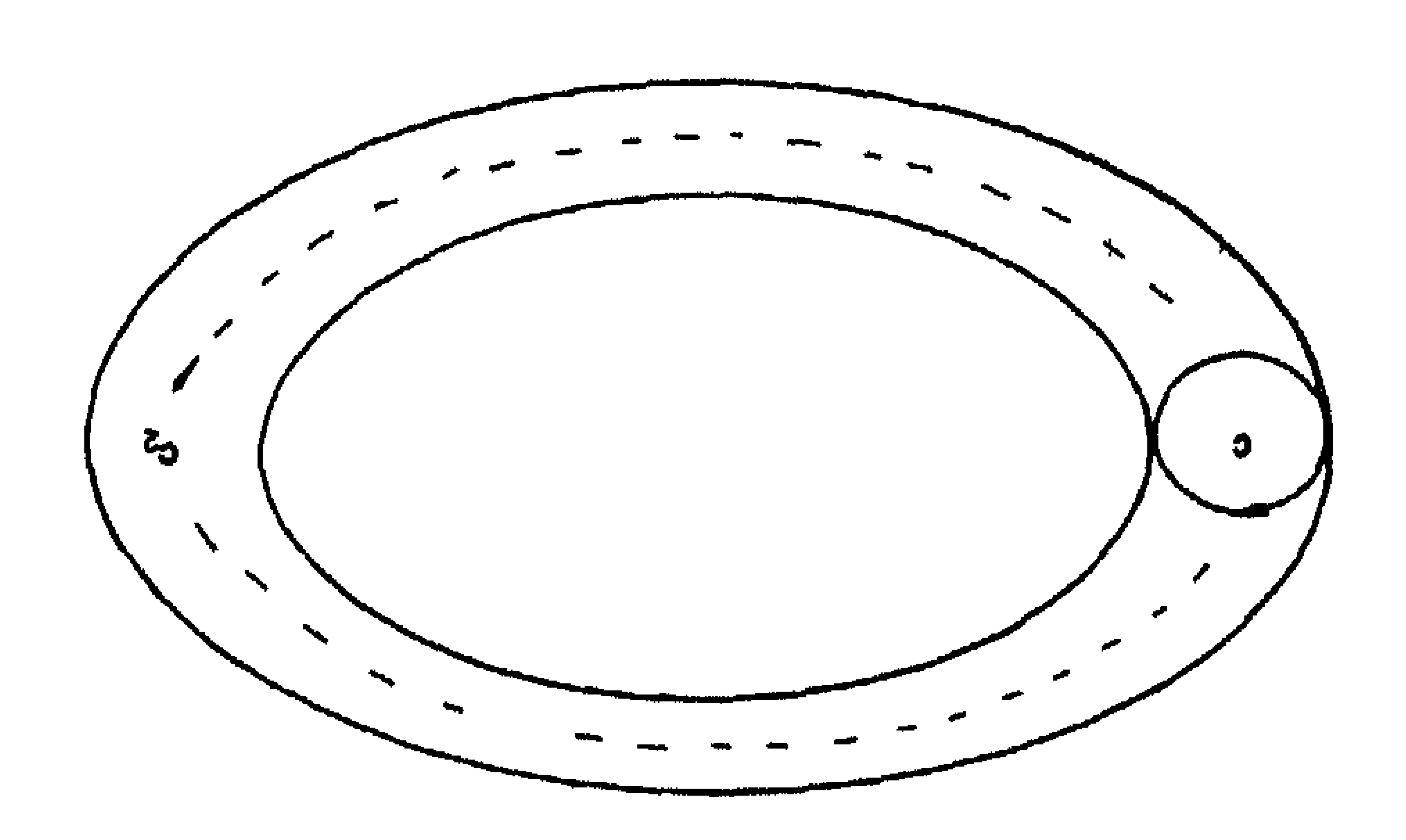
تحسنت مسألة استقرار النظام الشمسى كثيرا فى الخمسينات وبداية الستينات، حين وضعت نظرية كام، نسبة للعلماء الروسيين آندريه كولموجوروف Andrei Kolmogorov وفلاديمير أرنولد Vladimir Arnold وجورجن موزر Jurgen Moser. تنطبق النظرية فقط على النظم غير الدورية المحافظة على الطاقة، ولكنها تضم كافة ما يهم العلماء بالنسبة للنظام الشمسي. وقد اتخذ كولموجروف الخطوة الأولى فى الخمسينات، حين درس استقرار نظام افتراضى مكون من عدة كواكب تحت اضطراب خفيف. لم يتوصل كولموجوروف للحل، ولكنه وضع الأساس الذى سار عليه أرنولد، ثم وسع موزر من نطاق النظرية فيما بعد.

تلعب ظاهرة الرنين بين الزمن الدورى للمدارات دورا هاما فى النظرية، ومن ثم فسوف نلقى نظرة عليها فى البداية. إن أى حركتين دوريتين يقال إن بينهما رنين إذا كان زمن إحداهما الدورى عددا صحيحا من زمن الأخرى. فلو أن قمرا لكوكب يدور دورة واحدة فى نفس الوقت الذى يدور فيه قمر آخر دوروتين حول نفس الكوكب، فإنه يقال إن بين المدارين رنين ٢ : ١. وقد يكون مدارا القمرين فى رنين مع مدار الكوكب ذاته. إن مثل هذا الرنين يلعب دورا هاما فى حالة الهيولية.

وقد بدأ كولموجوروف بدراسة حالة نظام كوكبى بسيط، يوجد له حل معروف، ثم تساءل عن تأثير الاضطراب الطفيف عليه. والاضطرابات الطفيفة أمر شائع فى النظام الشمسي، فالأرض مثلا وهى تحت تأثير الجذب الشمسي، تتأثر بجذب آخر من القمر ومن الكواكب الأخرى، مما يسبب اضطرابا ضئيلا فى حركتها، وهو لحسن الحظ من الصغر بحيث لا يسبب خطورة على مدارها فى المستقبل القريب.

والمكان الملائم لدراسة هذه المسألة هو فضاء الطور، وعلى ذلك فقد لجأ كل من كولموجوروف وأرنولد له. وفضاء الطور لدورتين متوافقتين هو سطح طارة كما علمنا من قبل، أحد الدورتين ممثلة بالمدار الصغير على الطارة (المدار c1 فى الشكل، والدورة الأطول ممثلة بالمدار حول الطارة ذاتها (المدار c2). إن تصرف النظام حساس جدا للنسبة بين المدارين. فلو أن النسبة بينهما كانت بين عددين صحيحين، كان النظام دوريا، وكل نقطة تمثل حالة من حالات النظام لا بد أن تعود لموضعها كل دورة. ومن جهة أخرى فلو أن أحد عناصر النسبة كان عددا غير مُنطق (مثل الجذر التربيعى للعدد ٢).

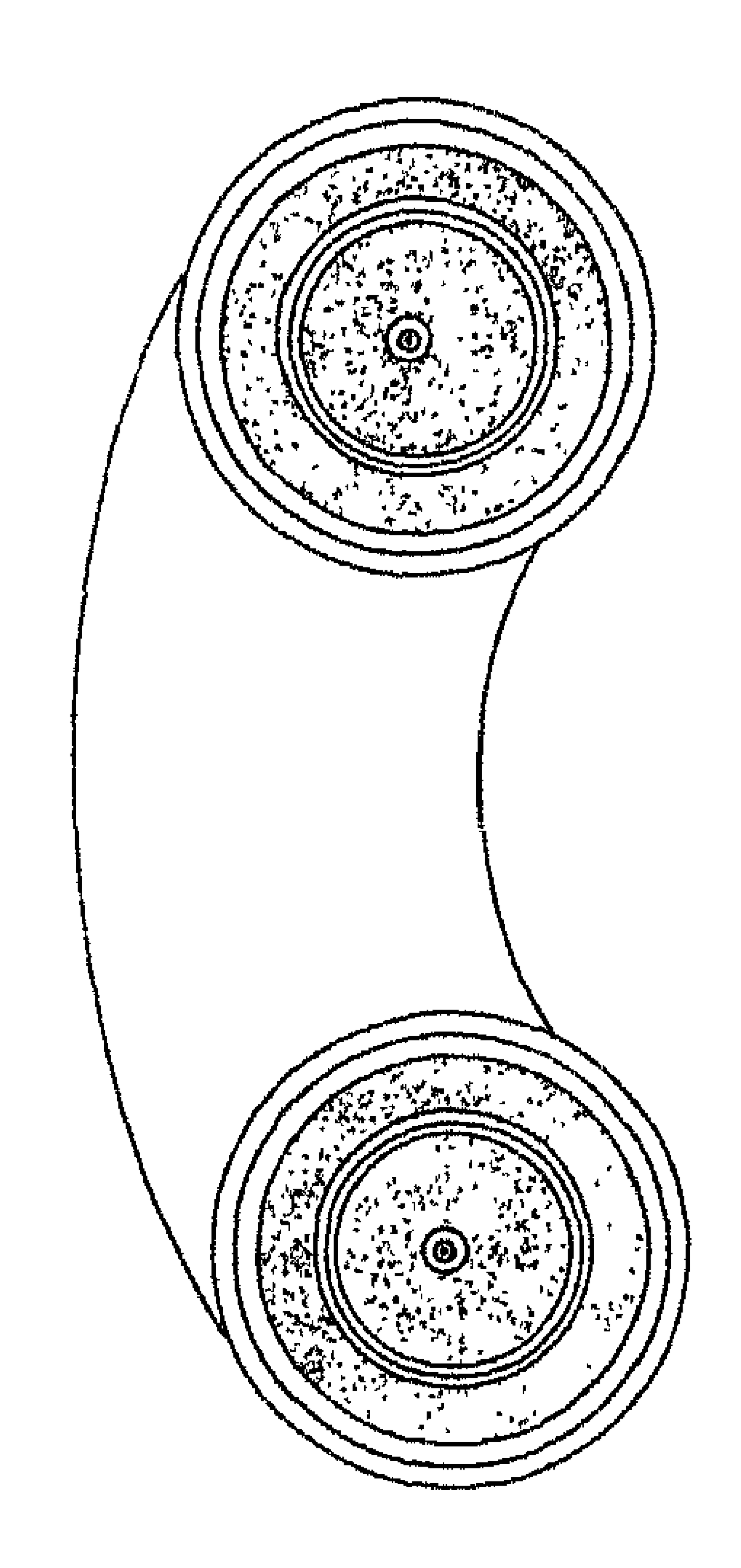
فإن النظام يكون شبه دورى، بحيث يتلولب المدار على سطح الطارة، ولا تعود نقطة إلى سابق عهدها.



أنصاف الأقطار لشكل الطارة

وقد وجد كولموجوروف وأرنولد أن المسارات الدورية غير مستقرة، بينما تلك التى تكون شبه دورية فمستقرة. هذا هو مضمون نظريتهما. فالصياغة الرسمية لهذه النظرية تقول: "إذا ما بدأت بنظام بسيط معروف الحل، ثم أدخلت عليه اضطرابا طفيفا، فإن النظام يظل نوعيا على ما هو عليه". إن لهذه النظرية مضمونا هاما بالنسبة للاستقرار طويل المدى للنظام الشمسي. وقد بين موزر فى الواقع أن نظاما كالنظام الشمسى يكون مستقرا فقط إذا ما كانت كتل الكواكب ولامركزية المدارات (مدى الاستطالة فيها) وميل محور الدوران كلها ذات قيم طفيفة، وللأسف لا يفى نظامنا الشمسى فى بعض مواضعه بهذه المطالب.

لكى نرى مغزى نظرية كام دعنا نلق نظرة فاحصة على فضاء الطور لكوكب ما. فاعتمادا على سرعت الكوكب يمكن أن يكون له أكثر من مدار، وينعكس ذلك فى فضاء الطور على صورة عدة طارات متداخلة. فالطارة الداخلية تمثل مدارا، والتالية لها تمثل المدار المحتمل الذى يليه، ولو أنك أخذت مقطعا فى فضاء الطور بطريقة بوانكريه، لحصلت على دوائر متقاطعة كما هو واضح بالشكل.



مقطع بوانكريه مبينا المسارات الدورية

تتحدد مدارات الكوكب بأحد من المدارات الممثلة، ومنها ما هو دورى ومنها ما هو شبه دوري. لنفرض في البداية عدم وجود اضطراب (الحالة المبينة) ثم ندخل عليها اضطرابا خفيفا. إن من شأن ذلك تشويه بعض الطارات، ومع زيادة الاضطراب تزداد الطارات المشوهة. على وجه الخصوص فإن المدارات الرنينية هى التى تشوه، مما يجعل نقطة الطور تحوم فى فضاء الطور أكثر وأكثر، تتقافز بين مدار وآخر من المدارات غير المستقرة، فتراها تتخذ مدارا ما لفترة معينة، ثم لا تلبث أن تتحول عنه إلى مدار آخر، وهكذا. بالتدريج يسود عدم الانتظام الفضاء بأكمله، وتتملك حالة الهيولية زمام الأمور.

إنك حين تلقى نظرة على مقطع بوانكريه بعد إدخال الاضطراب تجد تعقيدا بالغا. لقد اختفت دوائر كثيرة، ولكن دوائر صغيرة بدت تظهر داخل أخرى كبيرة. إنك فى

الواقع تجد نسخا تكرارية من المقطع الذى أصبح شكلا فراكتليا يتمتع بالتماثل الذاتي. فالنسخ الصغيرة تحتوى على نسخ أصغر إلى مالا نهاية.

لقد نظر إلى نظرية كام على أنها فتح علمي يشرح موضوع الاستقرار للنظم الكوكبية، ولكن عند تطبيقها على النظام الشمسي واجهت صعوبات جمة حطمت الآمال التي عقدت عليها، ولكنها مع ذلك قد زادت من فهمنا لاستقرار النظام الشمسى على المدى الطويل، ومن ثم فهى كشف لا تنكر قيمته.

الحاسوب والهيولية

إن ما كان مطلوبا عند هذه المرحلة هو ما يعين على أداء الحسابات الروتينية المتكررة والمرهقة لآلاف أو ملايين من المرات. وتزامن ذلك مع دخول الحاسوب فى الساحة العلمية فى الخمسينات والستينات. وقد استخدم الحاسوب عام ١٩٦٥ حينما نظر عدة علماء فى مسألة استقرار الكواكب الخارجية. لقد فحصت مداراتها بالتفصيل على مدى المائة والعشرين ألف عام التالية، ثم وسع الفحص إلى مليون عام. لم تكتشف أية حالة هيولية، ولكن وجد أن نبتون فى حالة رنين مع بلوتو، مما يحتمل معه أن تحدث مثل هذه الحالة.

وبعد عشرين عاما استغل التطور الهائل فى مقدرة الحاسوب لمد بساط البحث إلى خمسة ملايين عام، ومرة أخرى لم تكتشف حالة الهيولية، وكذلك ظل مصير نبتون وبلوتو موضع تساؤل.

على أن المثير أن التعرف على حالة الهيولية قد أتى ليس من دراسة استقرار الكواكب، بل من دراسة أحد الأقمار. قام بهذه الدراسة جاك ويزدوم من جامعة كاليفرنيا فى سانتا باربرا. ففى بداية الثمانينات بدأ ويزدوم فى النظر فى الاضطراب الغريب لحركة القمر هايبريون، أحد أقمار زحل. من المعروف أنه حين يقع جرم صغير تحت سيطرة جرم أكبر فإن سرعة دورانه حوله تتباطأ إلى أن تتساوى فى النهاية مع سرعة دورانه حول نفسه، وهى حالة القمر مع الأرض.

وحين نقلت مركبة فوياجير ٢ صورا لأقمار كوكب زحل لاحظ العلماء أن حركة القمر المذكور ليست محكومة بهذه الصورة، كما عرف السبب لذلك. فالكوكب ذو استطالة. ولهذا السبب فإن الجانب الأقرب لزحل يتعرض إلى قوة جذب أكبر من

الأجزاء الأخرى له، فيكتسب سرعة أعلى. ينتج عن ذلك أن تكون حركة القمر مضطربة بصورة كبيرة. وقد اكتشف ويزدوم أن حركته هيولية، بل واكتشف أيضا أنه لم يكتسب هذه الحالة إلا من وقت قريب.

وحين اقتربت فوياجير ٢ من كوكب نبتون ركز العلماء على أكبر أقماره، وهو القمر تريتون للنظر فى احتمال حالة هيولية به أيضا. وضع بيتر جولدرايش Peter Goldreich من معهد كاليفورنيا التقنى نموذجا رياضيا على الحاسوب لتاريخ القمر، وأنبأت نتائجه أنه كان يوما ما كوكبا سيارا إلى أن اقتنصه نبتون واتخذه قمرا له حين اقترب منه ذات مرة أكثر من اللازم. فى البداية كان له مدار بالغ الاستطالة، مما أتاح له أن يقتنص بدوره بعضا من أقمار نبتون، ولكن بمرور الوقت تحول مداره إلى أن يكون دائريا بسبب الاضطراب، ونجت بعض الأقمار من علمية الاقتناص. وتوافقت الصور المرسلة من فياجير ٢ مع نتائج نموذج جولدرايش، وقد اكتشفت ستة أقمار كلها أقرب إلى نبتون منها إلى تريتون.

وقد ثار الشك أيضا حول قمر آخر لنبتون، هو نيريد، فهو ذو مدار له استطالة يعتقد معها أن يكون قد مر بحالة من الهيولية فى الماضي. كما أن قمرى المريخ، ديموس وفوبوس قد مرا بمثل ذلك.

وأدى اهتمام ويزدوم بهايبريون إلى البحث عن حالة الهيولية فى مناطق أخرى من النظام الشمسي. وقد وجه اهتمامه فى بداية الثمانينات إلى حزام الكويكبات. ورغم أن أغلب الكويكبات تقع فيما بين المريخ وزحل، إلا أن توزيعها ليس منتظما. لقد اكتشف دانيال كيركوود من جامعة إنديانا وجود فجوات فيما بينها، وأن هذه الفجوات تقع حينما يكون زمن دورة الكويكب فى رنين مع زمن دورة زحل. وهناك فجوة ذات أهمية خاصة، تقع فى منطقة يدور فيها الكويكب ثلاث مرات فى كل مرة يدور فيها زحل مرة واحدة، أى أن نسبة الرنين هى ١ : ٣,٠ لقد ثار تساؤل فى وقت ما حول أن تكون الأرض قد أمطرت بنيازك آتية من تلك الفجوة، ولكن لم يكن ثمة من دليل على ذلك. وقد أثبت ويزدوم أن حالة الهيولية من شأنها أن تقذف ببعض الأجرام خارج الحزام بسرعات هائلة، وقد بينت الحسابات أن البعض منها قد أصاب الأرض بالفعل.

وفى عام ١٩٨٦ وجه ويزدوم اهتمامه إلى الكواكب الخارجية. لقد تمت دراستها فى الماضي، ولكن ويزدوم رأى أن يستغل تطور الحاسبات فى دفع الدراسة إلى أعماق

أكثر من الماضي. وتعاون مع جيرالد سوسمان من معهد MIT فى الرجوع بالدراسة إلى مائة مليون عام مضت! كان التركيز أكبر على الكوكب بلوتو لغرابة حركته، فتعمقوا فى الدراسة إلى ٨٤٥ مليون عام، واكتشفوا رنينا بين مداره ومدار نبتون، يمكن أن تتسبب فى حالة من الهيولية.

وفى دراسة مماثلة للكواكب الداخلية، قام كاك لاسكر من فرنسا بدراسة المستقبل إلى مائتى مليون عام، واكتشف دلائل على احتمال لرنين يمكن أن يؤدى أيضا إلى حالة الهيولية.

وانتهج مارتين دنكان Martin Duncan من جامعة كوين نهجا آخر. فقد استخدم الحاسوب لدراسة المستقبل لعدة مئات من الأجرام فى الفضاء خارج الكواكب الخارجية، ووجد احتمال حالة الهيولية فى نصفها فى غضون خمسة بلايين من الأعوام.

ومن المثير أن حالة الهيولية ليست مقصورة على المستقبل، بل يحتمل أن تكون قد لعبت دورا هاما فى الماضي، فى حقبة تكوين النظام الشمسي. فتدل أغلب النماذج على أن النظام الشمسى قد تكوّن من سحابة دوارة. ومن أشهر هذه النماذج ما وضعه العالم الفرنسى بيير سيمون لابلاس، وبمقتضاه فقد تحولت تلك السحابة إلى قرص دوار، سرعان ما تفتت إلى حلقات كونت كل حلقة كوكبا من الكواكب.

وقد درس جيمس كلارك ماكسويل نموذج لابلاس فوجده غير صحيح. لقد بينت الحسابات أن أكبر جرم يمكن أن يتكون بهذه الطريقة لا يزيد حجمه عن حجم كويكب، وكانت ضربة قاصمة لنموذج السحابة، ومن ثم فقد خرجت من دائرة الاهتمام إلى حين.

ففى منتصف الأربعينات بين س. فون فايزاكر C. von Weizacker أن بإمكانه تلافى نقد ماكسويل بافتراض وجود الاضطراب فى حركة السحابة. وعلى ذلك فقد وضع نموذجا أدخل فيه دوامات فى مناطق متفرقة منها.

وقام جيرارد كويبر Gerard Kuiper بخطوة أخرى للأمام عام ١٩٥١، حين افترض توزيعا عشوائيا لتلك الدوامات، ثم أدخل مفهوم التراكم فى النموذج، والذى يمكن بواسطتة تجميع مادة تكفى لأجرام بحجم الكواكب. والنموذج المقبول اليوم هو أحد تطويرات ذلك التصور. المثير فى هذا النموذج اعتماده على الدوامات الموزعة عشوائيا، وهى نتيجة من نتائج حالة الهيولية.

لا يزال العلماء بعيدين بقدر كبير عن وضع نموذج لتكوين النظام الشمسى مبنى تماما على الهيولية. بل إن أهمية الهيولية فى تكوين النظام الشمسى لا تزال نقطة خلافية. ولكن الاحتمال قوى على أنها لعبت دورا ما، فهى تفسر مثلا تكون فجوات فى السحابة الكونية مثل ما فسرت فجوات حزام الكويكبات، ولكن المضى أبعد من ذلك يدخل فى دائرة الشك أكثر من اليقين.

لقد تحدثنا إلى الآن عن الهيولية فيما يتعلق بالكواكب والأقمار والكويكبات. ولكن اتضح أنها تسرى أيضا على الرياح الشمسية، تلك الجسيمات التى تنفثها الشمس فتقتنصها الأرض، وهى مكونة أساسا من الإلكترونات والبروتونات. هذه الرياح تتأثر بالمجال المغناطيسى للأرض، فيندفع البعض منها إلى منطقة الغلاف المغناطيسي. وفى الاتجاه البعيد عن الشمس يتكون ذيل مغناطيسى طويل تقتنص فيه تلك الجسيمات. وفى فترة النشاط الشمسى المتزايد، والذى يتكرر كل أحد عشر عاما، يتشوه هذا الذيل، فيزداد فى الطول ويقل فى السمك، ولكن الأرض تستعيده إليها مرة أخرى. نتيجة لكل ذلك يتكون الشفق القطبى عند قطبى الأرض.

وقد فحص كل من ساندرا تشابمان Sandra Chapman ونيك واتكنز Nick Watkins من جامعة ساسكس ديناميكية هذه الظاهرة، وقاما بحساب مسار تلك الجسيمات مع تغير المجال المغناطيسي، وبينا أنها تدور فى مسار لولبى حول خطوط المجال المغناطيسي، كما لو كانت تتحرك فى سلك ملف كهربي. فى نفس الوقع فإنها تقفز للأمام والخلف عبر الذيل المغناطيسى الضيق السمك. هاتان الحركتان تتمان بدورية معينة، وقد يحدث أن تتوافقا فى رنين ينتج حالة هيولية فى حركة تلك الجسيمات.

ومن المواضع الأخرى التى يمكن أن تثور فيها حالة الهيولية الشمس ذاتها. فمن المعروف أن نشاطها يزداد على فترة دورية تبلغ أحد عشر عاما، يتغير خلالها عدد البقع السوداء على سطحها بصورة كبيرة. كما يشاهد تغيير آخر فى نشاط الشمس على فترة دورية أكبر، تبلغ ثمانين عاما. كما توجد دورتان أخريان معروفتان للبقع الشمسية تختفي فيها تماما.

وقد درس موضوع التغير فى البقع الشمسية فريق عمل من مركز كلورادو للدراسات الفيزيوفلكية فى الفترة من عام ١٧٤٩ إلى عام ١٩٩٠. وقد تتبع أعضاء الفريق ملامح حالة من الهيولية، فوقعوا على اكتشاف هام. لقد كان من المعتقد أن

موضوع البقع الشمسية من التقعد بحيث يحتاج وضع نموذج رياضى له إلى عدد كبير من المعادلات، فبين فريق كلورادو أن نموذجا من ثلاثة معادلات مبنى على نظرية الهيولية كاف تماما لنمذجة المسألة، وعلى هذا الأساس فإن الهيولية تلعب دورا هاما فيها. وقد بينت حساباتهم أن هذا النموذج يتنبأ بأغلب مشاهدات الظاهرة، وهو أمر لم يتح لنظرية أخرى. فهذه النظرية الجديدة يمكنها أن تعطينا رؤية جديدة عن التكوين الداخلى للشمس.

كما يمكن أن تكون لنظرية الهيولية دور هام فى موضوع حلقات زحل، فهى أولا وأخيرا تشبه حزام الكويكبات، ولو أنها تضم شيئا من الرنين فإن الهيولية سوف تكون محتملة الوقوع. كما أن بقعة المشترى الحمراء يمكن أن تنم عن حالة هيولية.

من الواضح إذن الهيولية تلعب دورا هاما فى النظام الشمسي. وقد مررنا مرور الكرام فى هذا الفصل على بعض الموضوعات المتعلقة به، وفى الفصول القادمة سنتناول بعضا منها بشىء من التفصيل.

الفصل التاسع

الهيولية فى حزام الكويكبات

فى عام ١٧٧٢ تقدم الفلكى الألمانى جوهان تيتس إلى جون بود فى مرصد برلين بعلاقة حسابية بسيطة اكتشفها، تعطى المسافة بين الشمس والكواكب. تقول العلاقة: بالنسبة للمتوالية ٠، ٣، ٦، ١٢، ٢٤، ... أضف ٤ ثم اقسم على ١٠، تحصل على المسافة بين الشمس والكواكب معطاة بالمسافة الفلكية، أى المسافة بين الشمس والأرض. أعجب بود بهذه العلاقة وتولى نشرها حتى صارت تعرف باسمه، مع تجاهل اسم تيتس تماما.

ولكن هذا القانون (ليس فى الواقع قانونا بالمعنى الصحيح) كان غير متفق مع الأرصاد فى كونه يتنبأ بوجود كوكب فيما بين المريخ والمشترى، وهو أمر لم يكن قد تحقق منه أحد فى ذلك الحين. ولكن العديد من الفلكيين كان يظن بوجود مثل ذلك الكوكب، وحين انتشر قانون بود زاد هذا الظن رسوخا، فاتجهت الأنظار إلى تلك المنطقة من النظام الشمسى.

لم يكتشف أى شيء فى تلك المنطقة حتى عام ١٨٠١، حين أعلن الفلكى الإيطالى جيوسبى بيازى Guiseppe Piazzi عن اكتشافه جرما أسماه سيرس Ceres. وقد بين جوهان جاوس Johann Gauss أنه يقع بالفعل بين المريخ والمشترى. ظن وقتها أن الكوكب المفقود قد عثر عليه، ولكن فى غضون سنوات تم العثور على ثلاثة أجرام أخرى فى نفس المنطقة، وكانت الأجرام الأربعة جميعها فى حجم غاية فى الضآلة بالنسبة لحجم كواكب المجموعة الشمسية، فأكبرها حجما، وهو سيرس، قدر قطره بأنه لا يزيد عن عدة مئات من الأ ميال (نعلم الآن أن قطره حوالى ٤٨٥ ميلا). وبعد اكتشاف هذه

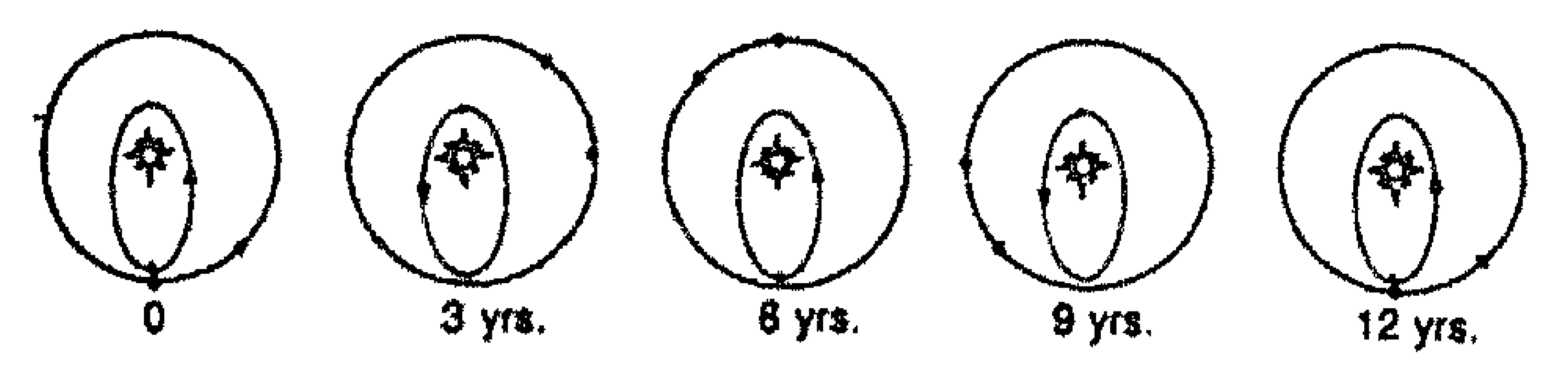
الأجرام الأربع مر حوالى ٤٠ عاما قبل اكتشاف المزيد. فبزيادة التلسكوبات تحسنا اكتشف عام ١٨٥٠ ثلاثة عشر جرما جديدة.

ترى ما هذه الأجرام؟ لقد كان الظن فى البداية أنه يوجد كوكب واحد، فهل هى شظايا كوكب متحطم؟ لم يكن أحد يعرف على وجه التحديد، ولكن المنطقة أصبحت مثار جذب للمزيد من الاكتشافات. فكل من عثر على جرم تثبت الحسابات أنه لم يكتشف من قبل يكون له شرف إطلاق اسمه عليه. وكان دانيال كيركوود Daniel Kirk-wood من أولئك الذين أصابتهم حمى هذه الاكتشافات.

ولد كيركوود فى ماريلاند عام ١٨١٤، ولم يحصل على قسط كبير من التعليم الأولي، ولكنه كان متحمسا لذلك، فقام بتعليم نفسه الرياضيات والعلوم على مدى سنوات. كان مغرما بالرياضيات، ولكنه كان أيضا مشدودا للفلك، فقرر الجمع بينهما. وبعد حين حصل على وظيفة لتدريس الرياضيات والعلوم في دالاور كولدج، ثم فى جامعتى إنديانا وستانفورد.

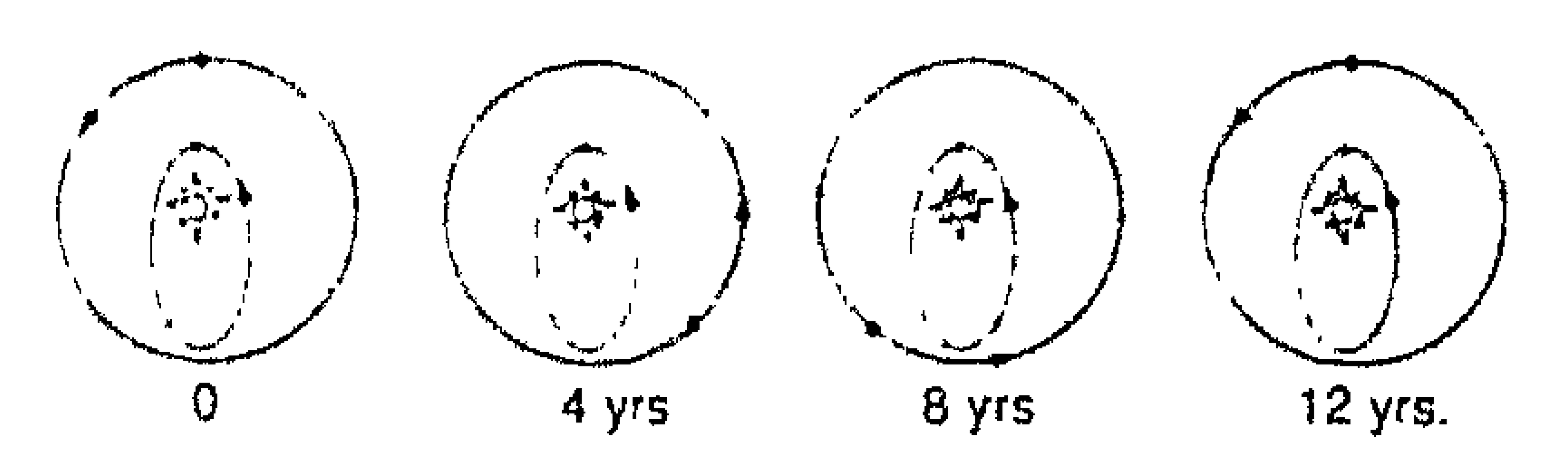
وجذبت الكويكبات نظره فى الخمسينات من القرن التاسع عشر، ووقتها كان قد عُرف منها زهاء الخمسين. وعلى خلاف الجميع لم يكن مهتما باكتشاف المزيد، بل بتوزيعها عبر الفضاء. هل تراها موزعة بانتظام؟ هذا ما تصدى للكشف عنه. كان لأغلبها مدار بيضاوي، يشير محوره الأكبر فى اتجاهات مختلفة. وعلى ذلك فقد وضع شكلا بيانيا لأطوال أنصاف المحاور الكبرى للكويكبات المعروفة آنذاك، وكم كانت دهشته وسروره فى نفس الوقت أن وجد توزيعا بينها، كما وجد فجوات فى هذا التوزيع.

ارتفع عدد الكويكبات المكتشفة بحلول عام ١٨٦٦ إلى ٨٧، وأضاف كيركوود بياناتها إلى القائمة، ولكن الفجوات ظلت موجودة. كما أنه فى ذلك الوقت كان قد اكتشف ظاهرة أخرى غاية فى الإثارة، وهى أن الفجوات ليست عشوائية كما بدت فى البداية. لقد كانت تحدث كلما وجد رنين يربط مدار الكويكب بمدار المشترى. وقد وجدت فجوة كبيرة بوجه خاص عند رنين ٣: ١، بمعنى ثلاث دورات للكويكب حول الشمس مقابل دورة من المشترى، ولكن وجدت فجوات أخرى عند رنين ٢:١ و٢: ٥.



رنين ٢:١، الكويكب (المدار الداخلى) له دورة ٦ سنوات والمشترى ١٢ سنة

كان كيركوود متأكدا من وجود رابطة بين تلك الفجوات وجاذبية المشترى للكويكبات. كان من السهل رؤية عدم استقرار المدارات فى حالة وجود رنين، ذلك لأنه حين تتوافق الدورات بين الكويكب والمشترى فى رنين ما، فإنه يتكرر حدوث وقوع الكويكب على خط واحد بين الشمس والمشترى، وكلاهما ذا جاذبية قوية. ففى حالة رنين ٢:١، فإن ذلك يعنى أنه كل ست سنوات (مدار المشتري) يكون الكوكب قد دار حول الشمس مرتين. معنى ذلك أن الكويكب يعانى من الشد بين جاذبيتى الشمس والمشترى مرة كل ١٢ عاما.



رنين ٣:١، الكويكب (المدار الداخلى) له دورة ٤ سنوات والمشترى ١٢ سنة

كان كيركوود مقتنعا بأن سبب الفجوات هى جاذبية المشترى، ولكنه كان عاجزا عن الإثبات، وعلى ذلك فقط ظلت هذه الفجوات لغزا على مدى قرن من الزمان.

وتزايدت أعداد الكويكبات المكتشفة، خاصة مع إدخال التصوير الفوتوغرافى فى عمليات الرصد الفلكى عام , ١٨٩١ تبدو هذه الكويكبات كلطخات ضئيلة على صفحة نجوم السماء، وحتى يثبت الفلكى أنها كويكب بالفعل، عليه أن يتتبع تغير موضعها على مدى عدة أيام، وهو عمل شاق، خاصة وقد ينتهى البحث إلى أن الكويكب ليس جديدا، ولكن المشقة تهون أمام شرف إطلاق اسم الفلكى عليه. وإلى الآن فقد سميت وصنفت الآلاف من هذه الأجرام. (اقترح ويليام هارتمان فى كتابه عن الفلك لعبة طريفة، هى تكوين جمل لا تدخل فيها إلا أسماء الكويكبات، وكانت إحدى جمله المفضلة تقول: "لم تتناول روكفليا قط هامبرجر ماكدونالز" (Rockefellia Neva Edda McDonalda Hambergera

لا يعـرف أحـد عدد هـذه الأجرام بالتـحـديد، فـقـد يقـدر عـددها بالملايين. ومن الكويكبات المعروفة لا يزيد عدد ما يبلغ قطرها أكبر من ٦٥ ميلا عن ٢٥٠ جرما، كما أن عدة آلاف منـها لا يزيد قطرها عن ميل واحد. إن أغلب الكويكبات تقع بين المشترى والمريخ، ولكن البعض منها يقع فى مدار المريخ، وقليل منها يمر أمـام الأرض. ويطلق على الكويكبات التى تقع فى مدار الأرض اسم "أجرام أبولو".

إن هذا العدد الضخم من الكويكبات يوحى بأن موضعها من الفضاء مكدس بها، ولكن هذا ليس صحيحا، فمتوسط المسافات بينها يقدر بملايين الأميال، وقد عبرت المركبات الفضائية هذه المنطقة دون أية مشاكل.

إن السؤال الذى خطر ببال الجميع منذ اكتشاف أول كويكب وإلى عهد قريب هو من أين أتت. لقد ظن الكثيرون أنها بقايا كوكب متحطم، وهو افتراض بدا معقولا طبقا لقانون بود. ولكن مع المزيد من المعرفة عن النظام الشمسي، خاصة عن منشئه، صرف النظر عن هذه الفكرة. فعلى الرغم من كثرة هذه الأجرام، فإن كتلتها الكلية لا تزيد عن جزء من خمسين جزءا من كتلة الأرض. معنى ذلك أنها على أحسن الفروض لا تشكل إلا كوكبا ضئيلا فى المجموعة الشمسية. والأكثر من ذلك فإن اختلافا فى مكونات هذه الكويكبات قد اكتشف. إن الأقرب منها للمريخ تبدو فاتحة اللون، بينما تبدو الأبعد بلون داكن، مما يوحى بوفرة الكربون فيها. ومن المعروف أن مكونات الكواكب تتغير مع البعد عن الشمس، وهذا التغير ملحوظ فى الكويكبات، مما يعنى أنها تكونت مع تكون النظام الشمسي، أى منذ خمسة بلايين عام.

وقد تعددت محاولات تفسير فجوات حزام الكويكبات. فاستمر البعض فى دراسة جاذبية المشترى اعتقادا بأنها مفتاح القضية. واتجه آخرون إلى تصور أن التصادمات بين هذه الكويكبات هى السبب فى تلك الفجوات، بينما رأى البعض الآخر أن تكونها أمر طبيعى يتوافق مع تكون النظام الشمسى ذاته.

وأخيرا اتجهت الأنظار إلى دراسة توازن الكويكبات طبقا لنظرية الهيولية. وكما رأينا سابقا فإن محاولات لدراسة استقرار بعض الكواكب قد أجريت. أمن المحتمل أن تلعب الهيولية دورا فى تكون هذه الفجوات؟ كانت الإجابة تقتضى أجراء حسابات مكثفة، رغب عن القيام بها الكثيرون، إذ يطلب لذلك حل معادلة نيوتن مرات ومرات. لقد قام بوانكريه بالدراسات المبدئية، فنظر فى ديناميكية منطقة الرنين ٢:١ وقد نهج

أسلوب الدراسات السابقة عليه، والتي تسمى طريقة أخذ المتوسطات. على أن بوانكريه سرعان ما انتابه الشك فى جدواها. لقد أزعجه وجود تغييرات كبيرة مع تغير طفيف فى الظروف الأولية، وهو ما نعرف اليوم أنه شيء مرتبط بظهور حالة الهيولية.

لم يكن تطبيق نظرية الهيولية على حزام الكويكبات بجدية متاحا إلا بحلول السبعينات من القرن العشرين، بعد زيادة سرعات الحواسب. قام بما يعتبر من أوائل الدراسات فى هذا الشأن العالم الألمانى ر. جيفن R. Giffen، وكما فعل بوانكريه من قبل ركز على منطقة الرنين ٢:١. لقد وجد جيفن حالة الهيولية، ولكنه لم يستطع وضع آلية للربط بينها وبين تكون الفجوات. وتابع العالمان س. فروشل C. Fraschle وهـ. شول H. Scholl من مرصد نيس بفرنسا الدراسة إلى عشرين ألف عام، ولكن دون أن يأتوا بجديد، لقد وجدوا حالة الهيولية ولكنهم استخلصوا أنه لا علاقة بينها وبين الفجوات.

بالإضافة لمنطقة الرنين ٢:١، فإن من أكثر المناطق احتمالا هى منطقة الرنين ٣:١. فى هذه المنطقة يدور الكويكب حول الشمس مرة كل أربع سنوات (بالمقارنة باثنى عشر سنة بالنسبة للمشترى)، وهذه الكويكبات تبعد عن الشمس مرتين ونصف المرة قدر بعد الأرض.

يمكنك أن تلاحظ من الشكل أن المشترى يكون معكوس الاتجاه مع الكويكب مرة كل ١٢ عاما، وهو ما يسبب اضطرابا شديدا للكويكب. صحيح أن الموقف أقل سوءا من حالة الرنين ١:٢، حيث إن التقارب مع المشترى يحدث والكويكب فى أقل مسافة مع الشمس (وهو ما يعرف بالحضيض الشمسي)، ولكن ذلك لا يمنع من احتمال حدوث الهيولية.

وأثارت منطقة الرنين ٣:١ اهتمام طالب دراسات عليا هو جاك ويزدوم فى أواخر السبعينات. كان مقتنعا من أن العالمين الفرنسيين لم يدرسا الحالة على مدى فترة كافية، ففترة عشرين ألف عام صغيرة للغاية بالمقاييس الفلكية. كما كان وزيدوم يعلم أيضا أن الحواسب المتاحة لن تفى بالغرض المطلوب، فذهب إلى أن الموقف يقتضى تغييرا فى منهج البحث ذاته، ووجد ضالته فى بحث للعالم السوفيتى ب. ف. تشيركوف نشر عام ١٩٧٩، متعلق بحالة الهيولية فى تحول الجسيمات الأولية لحالة البلازما. فى هذا البحث درست مسارات تلك الجسيمات موقعة فى فضاء الطور، وأخذت مقاطع بوانكريه عند عدة نقاط منها.

طور وزيدوم من هذا الأسلوب ونقح منه لكى يتناسب مع دراسة الكويكبات، وسر للغاية أن رآه ينفذ على الحاسوب بسرعة تبلغ آلاف المرات قدر أسلوب تطبيق معادلات نيوتن، ولكن التساؤل كان حول مدى دقة هذه الطريقة حين تطبق فى حالة الكويكبات. كان هذا السؤال يسبب قلقا شديدا لويزدوم، وبذل وقتا طويلا فى التفكير فيه.

من جهة أخرى فإن الفلكيين ينفرون من الطرق الحسابية التى لا تكون صالحة فى الاتجاهين، بمعنى أنها تصلح للماضى وللمستقبل معا. ولهذا السبب بدأ ويزدوم يفكر جديا فى إثبات مدى صلاحية طريقته، وانتهى إلى الاقتناع بأنها ملائمة تماما، وقام على الفور بدراسة مسارات ٣٠٠ كويكب تخيلى فى منطقة رنين ٣:١، كل واحد يختلف عن غيره اختلافا طفيفا فى الظروف الأولية.

ترى إلى أى مدى زمنى يجب أن تكون الدراسة؟ لم تكن الإجابة سهلة، ولكن ويزدوم كان يعلم أنها يجب أن تغطى على الأقل واحدا من الدورات الأساسية للكويكب. إن أقل دورة أساسية هى الفترة التى يدور فيها المحور الأكبر للمدار دورة كاملة، أى ٣٦٠ درجة، وهى تساوى ١١ ألف عام. ووجد ويزدوم أنه محتاج لأضعاف هذه الفترة كحد أدنى، ولكنه اكتشف أن قدرة حاسوبه تفوق هذا المطلب كثيرا.

ظل حاسوب ويزدوم يتوغل فى الزمن قرنا بعد الآخر، وعلى مدى الآلاف من الأعوام لم يكن هناك تغيير يذكر فى النتائج. وعلى حين فجأة تغير الموقف بعد حوالى مليون عام. لقد بدأت مسارات بعض الكويكبات القريبة من منطقة الهيولية تزداد فى الاستطالة بشكل بالغ. كانت فترات هذا التغير قصيرة للغاية، ولكنها كانت تتكرر بعد عدة مئات الآلاف من الأعوام. وظهر ذلك على شكل طفرات فجائية فى الشكل البيانى لأطوال المسارات.

يبدو الأمر غريبا أن يستمر جرم فى الدوران لمليون عام فى مدار شبه دائري،، ثم يطفر فجأة إلى مدار بيضاوى واسع الاستطالة، تدفع بالكوكب إلى الاقتراب من المريخ. لقد دهش ويزدوم من النتيجة لدرجة أنه رفضها فى البداية، وظن أن الأمر متعلق بخطأ فى الأسلوب الرياضى لمعالجة المسألة. وبعد دراسة مستفيضة علم أن الأمر ليس كذلك، بل تمكن من برهنة بعض الحالات بأسلوب أكثر بطئا.

وعرف ويزدوم السبب فى كون بحث فروشل وشول لم ينبئا عن هذا الاحتمال، فالسبب ببساطة يكمن فى ضيق فترة البحث. فبالنظر للشكل البيانى الذى يغطى

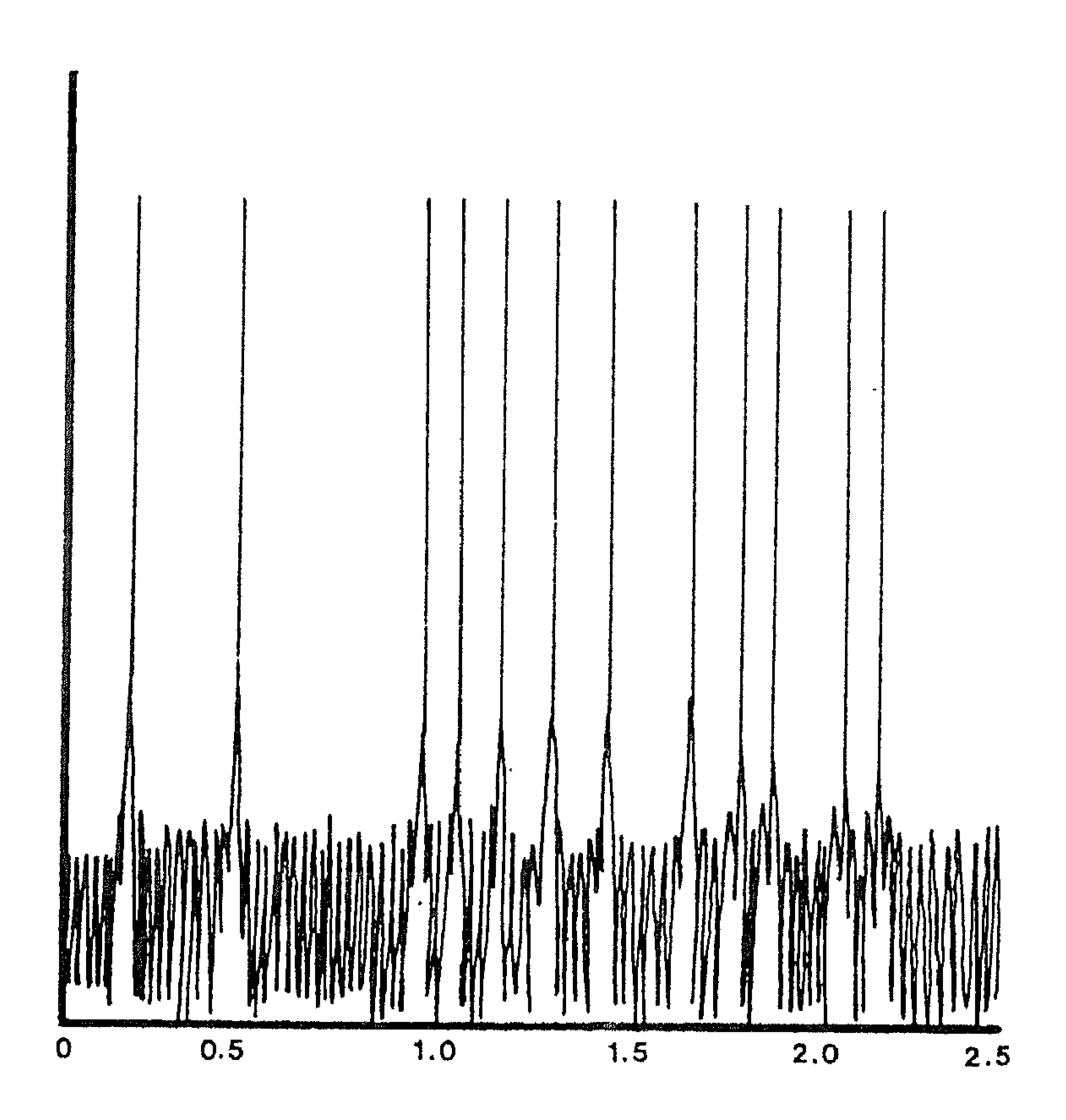
مليونين من الأعوام، نجد أنه فى غضون فترة بحث العالمين المذكورين لم تحدث أية طفرة من الطفرات الفجائية. يقول ويزدوم فى ذلك: "انظر إلى الافتقار فى المعلومات فى فترة المائة ألف عام الأولى. على أنك تلحظ تغيرا عند ثلاث مائة ألف عام".

ما أن اكتشف ويزدوم احتمال حدوث هذه الاستطالة الفجائية فى مدارات الكويكبات حتى علم سبب حدوث الفجوات. إن المسار الجديد يدفع بالكويكب إلى الاقتراب من المريخ، فيقتنصه هذا الكوكب، أو يدفع بمساره بعيدا فى الفضاء. إن الفجوات ليست بسبب جاذبية المشترى فقط، بل تساهم جاذبية المريخ أيضا فى تكوينها.

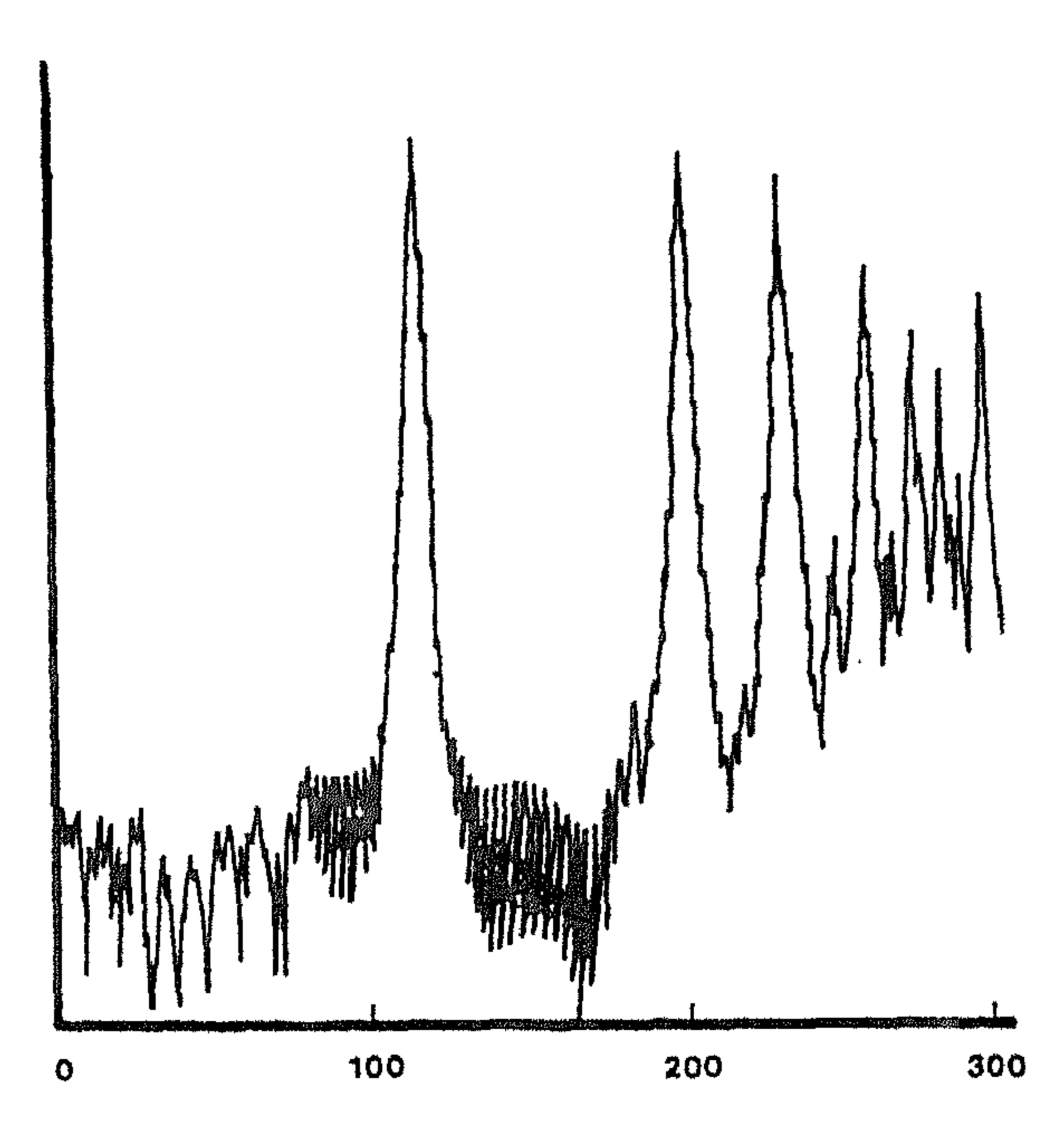
ما المدة المطلوبة لتكون فجوة من الفجوات؟ لقد بين ويزدوم أنه من الممكن أن تتكون فى فترة عمر النظام الشمسي، أى خمسة بلايين عام. وقد بينت أبحاث أكثر تطورا، بإضافة الاضطرابات نتيجة الكواكب الأخرى، وجد أن الاستطالة تزيد عما حسب من قبل، فتدفع ببعض الكويكبات إلى مدار الأرض. لقد ثبتت بذلك آلية ويزدوم فى تكون الفجوات.

كما أن كشف ويزدوم قد فسر ظاهرة مثيرة أخرى، وهى مصدر النيازك التى تعرضت لها الأرض. لقد كان العلماء يعتقدون أن مصدرها هو حزام الكويكبات، ولكنهم لم يملكوا الدليل على ذلك. فهل هذه الآلية هى السبب؟ لقد بين ويزدوم أن واحدا من كل خمسة كويكبات يندفع لتجاوز مدار الأرض من منطقة رنين ١:٣، وهو ما يبرهن على صحة ذلك الفرض.

لقد أصبح ويزدوم متأكدا من الآلية التى اكتشفها لتفسير تكون الفجوات. وشاركه فى هذا التأكد جورج ويذريل من معهد كارنيجى بواشنطون، وهو الذى تابع البحث بمزيد من التفصيل. على أن ويذريل كان يعرف أن اصطدام الأرض بجرم شيء، وكون هذا الجرم نيزكا من هذه المنطقة شيء آخر. وعلى ذلك فقد بذل جهدا كبيرا فى محاولة إثبات أن هذه المنطقة هى مصدر النيازك، وفى سبيل ذلك درس تأثير عدة عمليات على الكويكبات، مثل القرب من الكواكب والتحطم. وكم كان سروره بالغا أن وجد أن أغلب النيازك التى تأتى من هناك إلى الأرض تسقط بعد الظهر، وهو ما يتفق مع المشاهدات. والأكثر من ذلك أن أعدادها اتفقت أيضا من المشاهدات. بعد ذلك درس ويذريل صورا أخرى للرنين، فلم ينجح منها شيء نجاح رنين ٣:١.



الزيادة الفجائية فى استطالة المدار لكويكب بالقرب من منطقة رنين ١:٣ مع المشترى



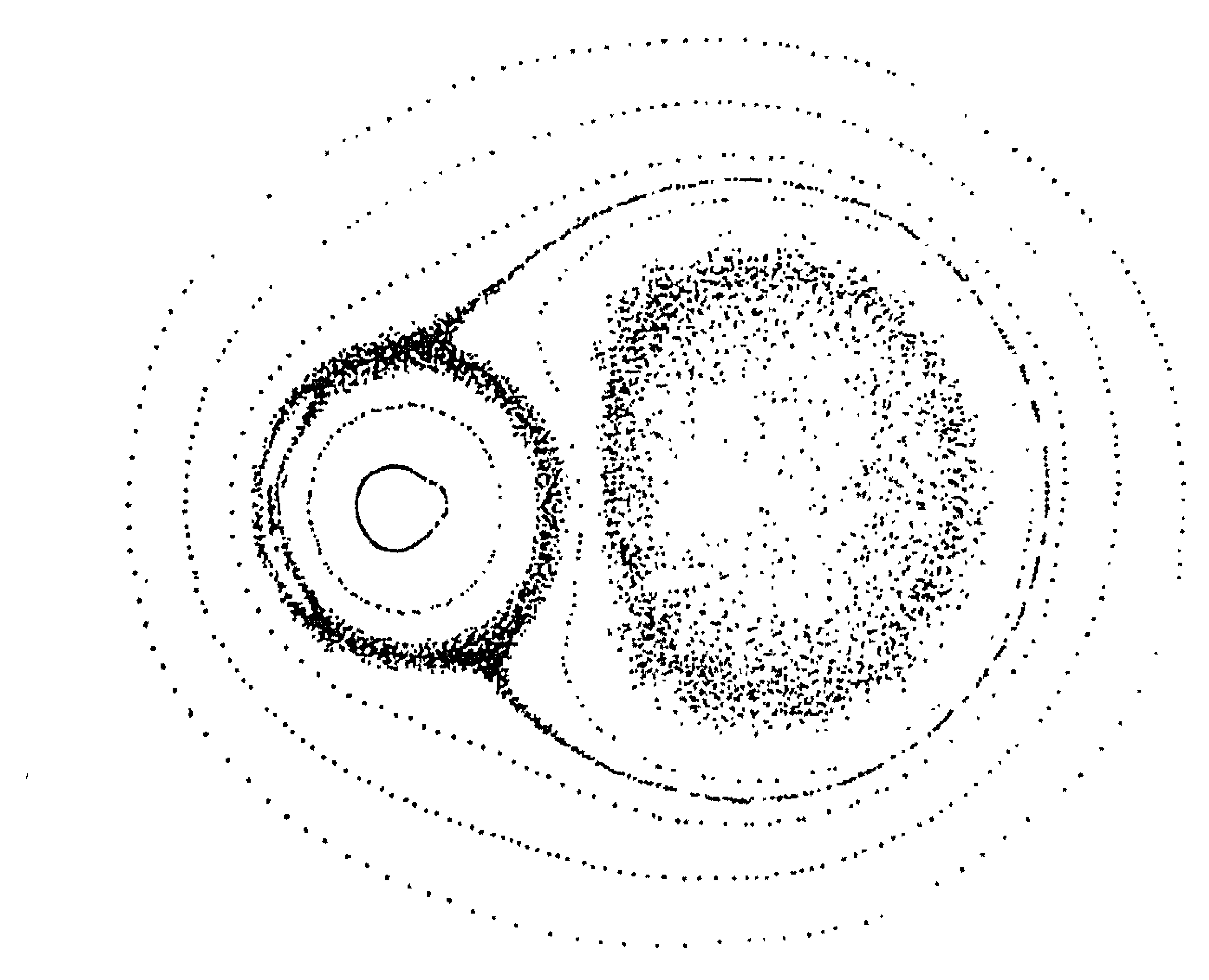
منحنى الاستطالة مع الزمن (المحور الأفقى مقدرا بملايين السنين) لمدار هيولى بالقرب من منطقة الرنين ١:٣

ولكن ثارت صعوبة ما، فتكوين كويكبات منطقة رنين ١:٣ يبين أنها من نوع الكوندريت (النيازك الحجرية)، وعدد هذا النوع المكتشف على الأرض لا يتفق مع ذلك. صحيح أنه من الصعب تحديد مكونات نيازك تلك المنطقة بدقة، فكل ما يعين على ذلك هو رؤية انعكاس الضوء عليها، ولكن الأمر بدا يمثل مشكلة.

مشكلة أخرى ثارت عند مقارنة حجم الفجوة التى أنتجها الحاسوب بالحجم الذى شوهد بالفعل، ففى البداية بدت الفجوة المنتجة ضيقة للغاية. على أن ويزدوم أدرك على الفور أنه قد قارن البيانات مع منطقة ضئيلة، وحين وسع من نطاق المقارنة تحسنت النتيجة بشكل ملحوظ.

رأينا أن حالة الهيولية تتسبب فى جعل مدارات الكويكبات تطفر فجأة إلى مدارات شاذة فى اسطالتها، فما السبب فى ذلك؟ إن أفضل طريقة لفهم السبب هو

النظر إلى مقطع بوانكريه لمنطقة الكويكبات. من السهل أن يرى أنها مقسمة إلى جزأين، منطقة صافية غير مشابه بالهيولية، تحتوى على نقاط فى أشكال حلقية، ومنطقة هيولية تتناثر النقاط فى كافة أرجائها. فالكويكب الذى فى المنطقة الأولى يكون مقيدا بمدار ما، أما الذى فى المنطقة الأخرى فيمكنه التجول على غير هدى. وحيث إن المنطقة متسعة، فلك أن تتوقع تغيرا هائلا فى استطالة المدارات.



مقطع بوانكريه لكويكب فى منطقة الرنين ١:٣

لقد اعتبر نجاح ويزدوم مع منطقة رنين ١:٣ نصرا علميا، ولكن ماذا عن بقية صور الرنين؟ فمنطقة ١:٢ بها فجوة أيضا، وهى أبعد كثيرا عن المريخ، وعلى ذلك فالآلية المكتشفة لا يبدو أنها تقدم تفسيرا مقنعا. فمهما بلغ قدر الاستطالة فليس من المتوقع أن يصل الكويكب للمريخ. وتمثل منطقة رنين ٢:٣ مشكلة أعوص، فهى مليئة بالكويكبات، يطلق عليها "أجرام هيلدا". إن وفرة الكويكبات فى هذه المنطقة أمر غير مفسر للآن. إن الحسابات الأولية تشير إلى استبعاد وجود حالة هيولية فيها، وهو ما يفسر عدم وجود فجوة بها، ولكنه لا يفسر تلك الوفرة من الكويكبات.

إن سبب عدم دراسة مناطق رنين ١:٢ و٢:٣ هو أن ديناميكيتها أعقد بمراحل من رنين ٣. ١. فالاضطرابات الناتجة عن تأثير الأجرام المحيطة أكثر بكثير.

وكما رأينا سابقا فإنه يوجد حالة من الهيولية فى منطقة رنين ١:٢، ولعلها تفسر وجود فجوة بها، ولكننا لا نستطيع استخدام نفس الآلية التى فسرت بها فجوة منطقة رنين ٣:١.

كما أن المنطقة أبعد من رنين ٢:٣ صعب دراستها أيضا، فعدد الكويكبات قليل هناك، ويبدو كما لو أن هذا الرنين يمثل حدا نهائيا لمناطق الرنين، ولكن السبب فى ذلك لا يزال مجهولا.

كان حزام الكويكبات نقطة انطلاق منطقية لدراسة الهيولية في النظام الشمسي، وقد وجدت بالفعل. وعلى الفور قبل تفسير ويزدوم فى دورها لإنتاج الفجوات فى ذلك الحزام، ولكن هل هى المكان الوحيد لمشاهدة الهيولية؟ سوف نرى فى الفصل التالى أن الأمر ليس كذلك.

الفصل العاشر

حالة هايبرون العجيبة، وعجائب أخرى

فى عام ١٨٤٨ تم اكتشاف قمر زحل الثامن، والذى أطلق عليه اسم هايبريون Hyperio n. وهو قمر معتم بسبب ضآلته المتناهية، فقطره لا يزيد عن ٣٠٠ ميل تقريبا، مما يجعل حجمه يقترب من عشر حجم قمر الأرض. يدور هذا القمر على مسافة شاسعة من كوكبه تبلغ ٩٨٠ ألف كيلومتر، ومداره يتميز باستطالة شاذة بالنسبة لمدارات أقمار الكواكب، ولكنها أقل شذوذا عن كثير من مدارات الكويكبات.

لم يكن هايبرون يزيد عن مجرد قمر جديد ترتيبه الثامن بين أقمار زحل. لم يكن واعدا بشيء يثير أهمية خاصة. الأهم من ذلك أنه لم يعرف عنه إلا القليل للمائة والخمسين عاما التالية، ثم كانت فوياجير.

حين اقتربت المركبة من نطاق زحل فى أغسطس من عام ١٩٨٤، وأرسلت بعض صور للقمر الضئيل، لم يكن الفلكيون يتوقعون شيئا مثيرا. وبالفعل بدا القمر كشأن العديد من أقمار السماء الضئيلة، مجرد صخرة مشوهة المظهر مليئة بالأخاديد والحفر.

ولكن القمر أبدى شيئا مختلفا، كان بداية لسلسلة من المفاجآت توالت على مدى الشهور التالية. لم يكن القمر كرويا كغيره من الأقمار، بل مفلطحا أشبه بقطعة هامبرجر ضخمة طولها ٢٤٠ ميل وسمكها ١٤٠ ميل.



قمر هايبريون

وأجريت الدراسات الروتينية. والشيء الذى يعطى أهمية خاصة زمن الدوران المغزلى (دورانه حول نفسه) واتجاه هذا الدوران. واستخدمت الحواسب لإجراء مقارنة اتجاه محور القمر بمجرد أن وصلت الصور، كما رصد القمر من مسافات أكبر، وجمعت البيانات حول شدة لمعانه. وخرجت كل هذه التحليلات بزمن دوران مغزلى مقداره ١٣ يوما.

ولكن حين بدأ الفلكيون يحددون اتجاه محور دورانه حول نفسه، أخذ العجب بهم. بدت الأمور أبعد ما تكون عن المنطق. لقد توقع الفلكيون أن يكون الدوران حول المحور الأقصر أو المحور الأطول، فهما ما يتوقع لدوران مستقر، ولكنه لم يكن يدور حول أى منهما.

كما كان عجيبا أن يكون زمن الدوران المغزلى مختلفا حول زمن الدوران حول الكوكب، وهما فى الغالب متساويان، وهو ما يشار إليه بالحركة المتزامنة synchronous.

وقمر أرضنا يخضع لهذه الحالة، فحركته المتزامنة تجعلنا لا نرى غير وجه واحد منه يوما بعد الآخر. وقبل أن نخوض أغوار الفضاء لم يكن لدينا أية فكرة عن الوجه الآخر من القمر. (نعلم الآن أنه مماثل للجانب المضيء، إلا أنه خال من المناطق الداكنة المسماة بالبحار).

من السهل تعليل حدوث الحركة المتزامنة. لنأخذ حالة قمر أرضنا. إن أحد جوانبه أقرب للأرض من الجانب الآخر (بالتحديد بمقدار ٢١٦٠ ميلا). وحيث إن الجاذبية تقل مع البعد، فإن الجانب الأقرب يجذب بقوة أكبر من جذب الجانب الأبعد. يتسبب هذا فيما يسمى بالانبعاج المدى tidal bulge في الأرض فى اتجاه القمر، حيث تجذب المحيطات، بل ومناطق اليابسة للخارج.

وحينما يدور القمر حول الأرض يحاول هذا الانبعاج أن يتبعه، على أنه لا يتمكن من ذلك تماما. فلو أنك كنت قاطنا بالقرب من محيط ما فلا بد أنك على دراية بأحد نتائج ذلك، فالمد لا يكون فى أقصى حالاته عندما يكون القمر فوق المنطقة تماما، بل بعد ذلك بعدة ساعات. ما الذى يسبب هذا التأخر فى الانبعاج؟ إنه نتيجة الفقد فى الطاقة نتيجة الاحتكاك بين المياه واليابسة.

ويتسبب هذا الاحتكاك فى زيادة طفيفة فى طول اليوم الأرضي، مقدارها ٣٣ ثانية لكل قرن. ومن المثير أن هذه النتيجة لها نتيجة أخرى. إن القمر يتباعد عنا بمقدار بوصة كل عام، نتيجة ما يعرفه الفيزيائيون بقاعدة "حفظ الدوران المغزلي، أو بالأحرى حفظ عزم الدوران" conservation of angular momentum. يعنى ذلك أن التغير فى الدوران المغزلى فى جزء ما من النظام يجب أن يعادل فى منطقة أخرى منه، ويظهر ذلك فى تباعد القمر كما قدمنا.

الأكثر من ذلك أنه بالضبط كما يتسبب الاحتكاك فى إبطاء حركة دوران الأرض حول نفسها، فإنها تتسبب فى نقصان ملموس فى نفس الحركة بالنسبة للقمر. إن سرعة دوران القمر حول نفسه قد أبطأت فى الواقع منذ ميلاده إلى اليوم بحيث أصبح يواجهنا بنفس الوجه على الدوام. ويعتقد بعض الناس أن مواجهة القمر للأرض بنفس الوجه يعنى أنه لا يدور حول نفسه، ولكن العكس هو الصحيح تماما، ويمكنك التأكد من ذلك بإمساك كتاب وإدارته حول رأسك. فلو أن الكتاب كان ثابتا لرأيته يواجه رأسك بكل جوانبه، أما لكى يواجهك بجانب معين من غلافه فعليك أن تديره حول نفسه بالسرعة المناسبة لتحقيق ذلك.

وحيث إن ظاهرة الحركة المتزامنة للأقمار هى الشائعة فى النظام الشمسى فقد كان متوقعا أن تكون حركة هايبرون من نفس النوع، حيث إنه واقع فى نطاق مد جذبى قوى من زحل. ولكن الحقيقة كانت غير ذلك.

وقد اهتم كل من جاك ويزدوم Jack Wisdom وأستاذه ستانتون بيل Stanton Peale وفرانسوا مينيارد Francois Mignard من فرنسا بهذه الظوهر الغريبة لهايبريون. كان التركيز فى هذا الوقت على القمر تيتان. فقد كان من المعروف أن له جوا، وكان العلماء شغوفين بمعرفة مكوناته. كان المتوقع أنه مكون أساسا من الميثان والأمونيا، ولكن المفاجأة التى بثتها فوياجير لهم أنه مكون أساسا من النيتروجين. ومع هذا الاهتمام البالغ بتيتان انزوى هايبريون عن الأضواء.

ثم بدأ يدخل بؤرة الاهتمام حين وصلت صوره، لقد كان دورانه حول نفسه عجيبا لم يصادف مثله فى النظام الشمسي. وشغف ويزدوم وفريقه بهذه النتائج، ما الذى يسبب هذه الحركة الغريبة؟ وبوضع نموذج بسيط لحركة هذا التابع على الحاسوب وجدوا سببين أساسيين لذلك؛ شكله الغريب، ووجوده بالقرب من تيتان. لقد كان هايبريون فى الواقع فى حالة حركة رنينية resonance مع تيتان بنسبة ٣:٤، فهو يدور حول زحل ثلاث مرات مقابل أربعة لتيتان. وقد بين وزيدوم أن الاستطالة الشاذة لمدار هايبريون هى بسبب هذا التزامن.

لقد اتضح أن الاستطالة الكبيرة تجعل الحركة التزامنية صعبة، فالسرعة تتغير بقدر كبير فى هذه الحالة، فتكون أكبر بمراحل حين يكون قريبا من الكوكب بالمقارنة بسرعته حين يكون فى الناحية الأخرى منه، ويصعب فى هذا الوضع تحقيق الحركة التزامنية.

وحسب الرجال المدة اللازمة لكى يحقق هايبريون حالة التزامن، فوجدوا أنها تساوى تقريبا عمر النظام الشمسي. وكان اهتمامهم منصبا بطبيعة الحال على سبب عدم استقرار محور دورانه حول نفسه، هل هو فى واقع الأمر، هيوليا؟ لم يكن بإمكانهم نمذجة القمر تماما، فشكله من الشذوذ بما يحول دون ذلك، وعلى ذلك فقد لجئوا للتقريب. اعتبروا فى البداية أن المدار البيضاوى غير متغير، وهو تقريب طيب بقدر كبير لأن التغير فى المدار أقل بكثير من التغير فى محور الدوران. بعد ذلك

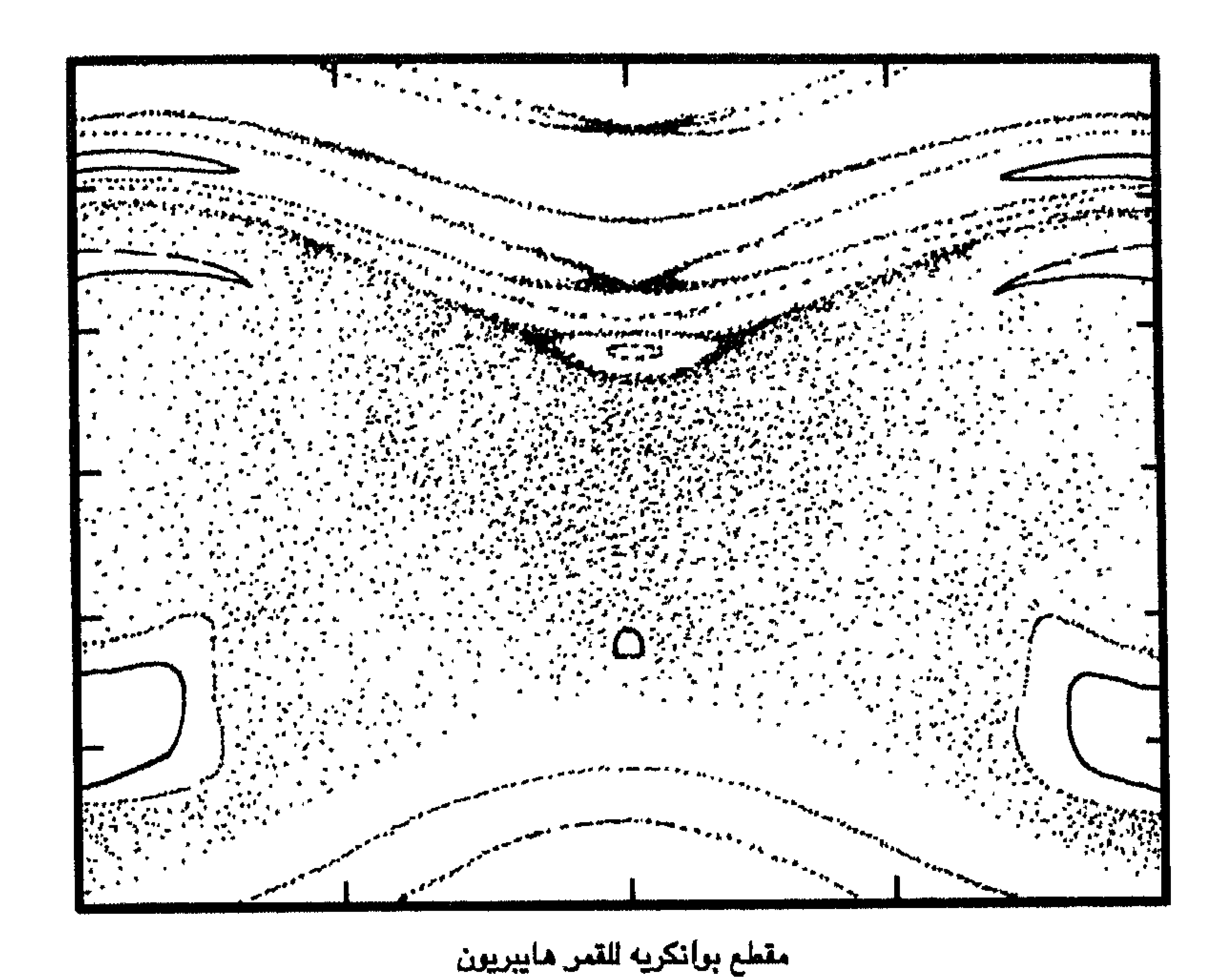
افترضوا أن المحور كان فى البداية متعامدا على مستوى الدوران، وبربط هذا كله مع الانبعاج المدى والتأخر فيه وقوة الاحتكاك، أرسل الموضوع للحاسوب، ثم أخذوا يتطلعون إلى ما يمكن أن تكون عليه حركة القمر.

كانوا كالعادة يرسمون المسار فى فضاء الطور، وينظرون إلى مقاطع بوانكريه. وتتحقق المدارات المستقرة فى مقاطع بوانكريه فى المناطق الصافية فقط، كما تتحقق المدارات الهيولية فقط فى المناطق المليئة بالنقاط. وكان ما حصلوا عليه مفاجأة لهم.

إن بعض حالات الرنين resonance بين الدوران المغزلى والدوران حول الكوكب تظهر كنسب بأعداد صحيحة بين زمن الدوران المغزلى والدوران حول الكوكب. من ذلك حالة الحركة التزامنية لقمر أرضنا التى ذكرناها سابقا، وهى حركة رنينية بنسبة ١:١، ومنها أيضا الحركة الرنينية لعطارد، وهى بنسبة ٢:٣، حيث يدور الكوكب حول نفسه ثلاث مرات مع كل دورتين حول الشمس.

وتحاط مناطق مثل هذه الحالات الرنينية بمناطق من الهيولية، لا يكون فيها زمن الدوران قابلا للتنبؤ. ولكن فى أغلب الأحايين تكون هذه المناطق ضيقة بالنسبة للقمر العادي، أما فى حالة قمر مشوه الشكل كهايبريون فقد بدت مناطق الهيولية عريضة، وسرعان ما تداخلت فيما بينها. وقد بين ويزدوم ورفاقه أن تداخل مناطق الهيولية حول مناطق الحركة الرنينية يكون من الضخامة بحيث تختفى حالة الرنين ٢:٣ وتستحيل حالة الرنين ١:٢ إلى جزر منعزلة. ومن المثير أنه كان من الممكن أن يستقر القمر هايبريون فى حالة الرنين لو أن محوره ظل متعامدا على مستواه دورانه، حتى فى داخل مناطق الهيولية. وقد بين ويزدوم أنه ما أن يدخل القمر فى حالة الهيولية حتى أن يتسبب أدنى حيود فى اضطرابه بصورة شاذة.

وبالنظر إلى الشكل يمكنك أن ترى ما تبقى من حالات الحركة التزامنية، فهى فى الركن الأيسر من الشكل. وتمثل الجزيرة فى الركن الأيمن حالة الرنين ١:٢، والمنحنيات فى أسفل الشكل حالات شبه الدورية اللارنينية. ومن السهل أن ترى من الخريطة أنه ما لم يكن القمر هايبريون قريب للغاية من الرنين، فإنه سوف يقع فى قبضة الهيولية.



مقطع بوانكريه للقمر هايبريون

وأكثر التصورات احتمالا لما حدث للقمر هايبريون حتى صار إلى حالته الراهنة طبقا لما يراه ويزدوم هو على النحو التالي. فى وقت ما كان زمن دورانه حول نفسه أقصر بكثير من زمن دورانه حول زحل، ويكون موضعه فى شكل بوانكريه فى أعلى الشكل. فى هذا الوقت كان محوره متعامدا تقريبا على مستوى الدوران. ومع مرور الزمن تباطأت حركة دورانه حول نفسه، ولو لم يكن ما لشكله من تشوه، وقربه من تيتان، لانتهى به الأمر إلى حركة تزامنية. ولكنه بدلا من ذلك دخل فى حالة الهيولية، وظل بها منذ ذلك الحين.

وليست حالة الهيولية بغريبة فى مثل هذه المواقف، فكما رأينا سابقا توجد مناطق هيولية ضيقة حول كافة حالات الرنين، بما فيها حالة الحركة التزامنية ذات الرنين ١:١، بحيث إن دخول التابع فى حالة رنينية يكون بعد مروره بحالة من الهيولية لفترة قصيرة. ولم يحدث ذلك بالنسبة لهايبريون، فأغلب شكل بوانكريه بالنسبة له هيولي.

فما أن يدخل هايبريون فى منطقة هيولية حتى تتأثر حركته بصورة عنيفة فى وقت قصير. ففى غضون دورتين أو ثلاث يبدأ فى الاضطراب بعنف، وربما يكون هذا ما

نقلته فوياجير عنه. على أن كمية الصور كانت قليلة للغاية بحيث لا تعطى فرصة لمقارنتها بتنبؤات ويزدوم بدرجة مرضية. تطلب الأمر إلى مراقبة أكثر، وبالطبع يجب أن تجرى من الأرض.

وسمع جيمس كلافتر James Klavetter بالمسألة فى ١٩٨٤، وقرر أن يجرب إن كان قادرا على أن يقوم بالمراقبة المطلوبة، ولكن كانت هناك مشكلة. إن العديد من مرات الرصد مطلوب لعدد من الليالى المتتابعة، تصل ما بين شهرين وثلاثة أشهر. كان هذا مطلبا غير يسير. إن الزمن المتاح للتلسكوبات القوية محدود للغاية، وحصولك على فرصة استخدامه لثلاث أو أربع ليال متصلة يعتبر إنجازا له وزنه، أما استخدامها لثلاثين أو أربعين ليلة فشيء لم يحدث من قبل.

إن ما كان مطلوبا هو مراقبة طويلة للتغير فى لمعان القمر، وهذا التغير يحدث بطبيعة الحال من انعكاس الضوء على سطحه أثناء اضطرابه، وهو ما يتطلب تلسكوبا قويا لالتقاطه.

وبمزيج من الحظ والتخطيط السليم استطاع كلافتر أن يحصل على متابعة للقمر لسبعة وثلاثين ليلة، وتطلب الأمر إجراء العديد من التصويبات، ولكن حين وُقِّعت النتائج فى النهاية بينت حالة هيولية واضحة فى تغير اللمعان تتطابق مع حالة الاضطراب الهيولي.

الهيولية فى أقمار أخرى

فى خضم اهتمام ويزدوم بالقمر هايبريون بدأ فى الانتقال إلى أقمار أخرى. فإذا كان دوران هذا القمر هيوليا فمن المنطقى أن نتوقع نفس الحالة لأقمار أخرى. وبدا القمر نيرايد Nereid أحد أقمار الكوكب نبتون مرشحا طيبا. ولكن بعد قليل من الأبحاث اتضح أنه ليس كذلك.

ثم تحول ويزدوم إلى قمرى المريخ دايموس Deimos وفوبوس Phobos، وهما من الأقمار الصغيرة، فأكبرهما، وهو القمر فوبوس، لا يزيد عن ١٦ ميل فى القطر، ومدة دورانه حول الكوكب ٧ ساعات و٣٩ دقيقة. أما القمر الثاني، وهو الأبعد عن الكوكب فقطره ثمانية أميال، ويدور حول الكوكب فى ٣٠ ساعة و١٨ دقيقة. وكلا القمرين يواجهان المريخ بنفس الوجه، أى أنهما من الأقمار المتزامنة.

ورسم ويزدوم مقاطع بوانكريه للقمرين، ووجد حالات من الهيولية لهما . إن كلا القمرين كانا فى حالة هيولية يوما ما، ولكنهما اليوم ليسا كذلك طبقا لاعتقاد ويزدوم. وطبقا لحساباته فإنه يتوقع أن يكون ديموس قد ظل فى حالة هيولية لمدة أطول من رفيقه، حيث إن زمن وصوله لحالة الحركة التزامنية تتطلب ١٠٠ مليون عام، بينما يتطلب فوبوس ١٠ مليون عام لذلك.

وكان ميرندا أحد أقمار أورانوس مثيرا للاهتمام أيضا، وقد مرت فوياجير على مسافة ٢٤ ألف ميل منه. هذا القمر وهو أحد أصغر أقمار أورانوس، ولكن مكمن الإثارة فيه أن سطحه يبدو أنه قد تأثر بقوى داخلية. فعلى سطحه توجد وديان عميقة يبدو أنها تكونت بسبب إجهادات داخلية. كما يشاهد على سطحه جبال شاهقة وقمم بركانية ومسارات للحمم وأخاديد عميقة. وقد اتجهت بعض الافتراضات إلى أن ذلك نتيجة لاضطراب هيولي، ولكن الدراسات الأكثر دقة تستبعد ذلك. لقد بينت الأبحاث أنه قد عايش حالة هيولية عند ميلاده، ولكن الوقت كان مبكرا لأن يسبب هذه التأثيرات.

هل من كواكب هيولية المغزلية؟

إذا كان محور الأقمار يحتمل الهيولية، فإنه يكون من الطبيعى التساؤل عن ذلك بالنسبة للكواكب. هل يوجد منها ما هو هيولي، أو بصورة أكثر عمومية، هل عايش أحدها هذه الحالة؟ إننا نعلم أن محور دوران الأرض يميل بمقدار ٢٣ درجة ونصف الدرجة، فهل كان الأمر كذلك على الدوام؟ وماذا عن الكواكب الأخرى؟ تصدى ج. لاسكار J. Laskar وب. روبيتال P. Robital لهذه الأسئلة فى عام ١٩٩٣, وباستخدام الحاسوب درسا ديناميكية محاور الكواكب، وتوصلا إلى نتائج مثيرة.

بالنسبة لعطارد، وكما رأينا سابقا، فهو يدور حول نفسه ببطء، واقعا فى قبضة رنين نسبته ٣:٢, وقد وجد الباحثان منطقة هيولية كبيرة، وبينا أن محور دوران الكوكب يحتمل أن يكون قد عانى فى الماضى من تغيرات فى زاوية ميله تتراوح ما بين الصفر إلى مائة درجة. كما بينت دراستهما أن سرعته المغزلية كانت أسرع بكثير، وأنها قد انخفضت بسبب القوى المدية. ورغم أن ميل محوره كان هيوليا، إلا أنه استقر مع الدخول فى حالة الرنين.

ويعتبر كوكب الزهرة مثيرا من ناحية حركته المتراجعة، بمعنى أن اتجاه دورانه معاكس لأغلب الكواكب الأخرى، لا يشاركه فى ذلك إلا أورانوس. والعلماء لا يزالون غير متأكدين من سبب ذلك، ولكن جاذبية الأرض لها بالتأكيد تأثير جزئي، أو حتى كلي. وقد وجد لاسكار مناطق كبيرة للهيولية، ولا يشك فى أن محور الزهرة قد عانى هو الآخر من تغيرات كبيرة فى الماضي.

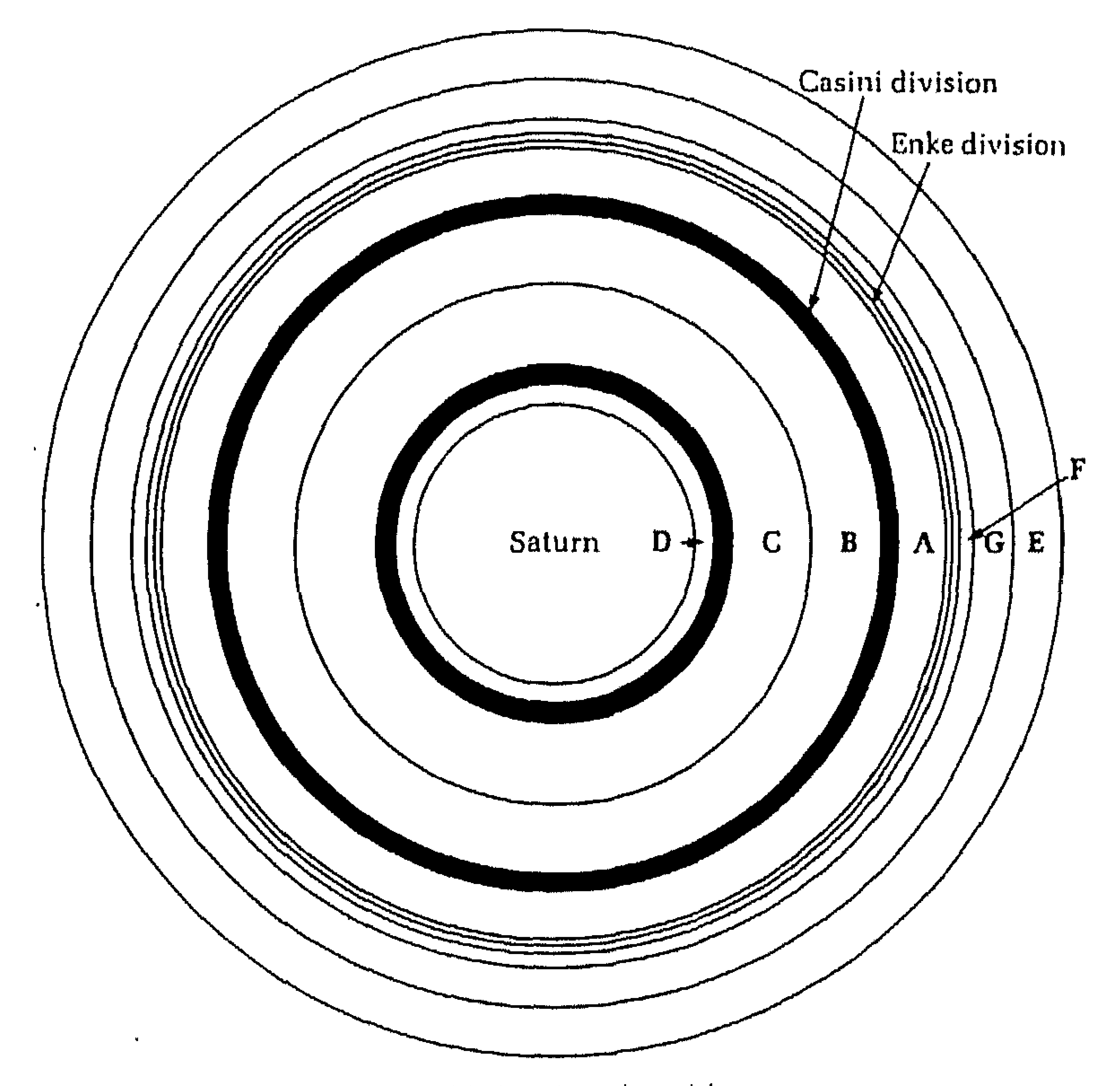
وأكثر الكواكب إثارة هو المريخ، من حيث إنه الوحيد الذى فى حالة الهيولية حاليا. فالتغير فى ميل محوره فيما بين الصفر و٦٠ درجة أمر محتمل حتى فى وقتنا الحاضر. وبين لاسكار أن التغير قد يحدث فى غضون عدة ملايين من الأعوام ليس أكثر. مثل هذه التغيرات تؤثر بشكل كبير على مناخ الكوكب وعلى طبيعة تكوينه الجيولوجي.

ويحتمل أن تكون الأرض بدورها قد مرت بحالة هيولية فى العصور المبكرة، ولكنها اليوم مستقرة بحيث لا يحتمل أى تغيير فى زاوية ميل محورها فى القريب العاجل. وهذه أخبار طيبة لأن تغيرا فى حدود درجتين سوف يدفع بالأرض إلى عصر جليدي ولكن للأسف فالقمر يتباعد عن الأرض، مما يجعل دخولها فى حالة الهيولية فى المدى البعيد أمرا محتملا.

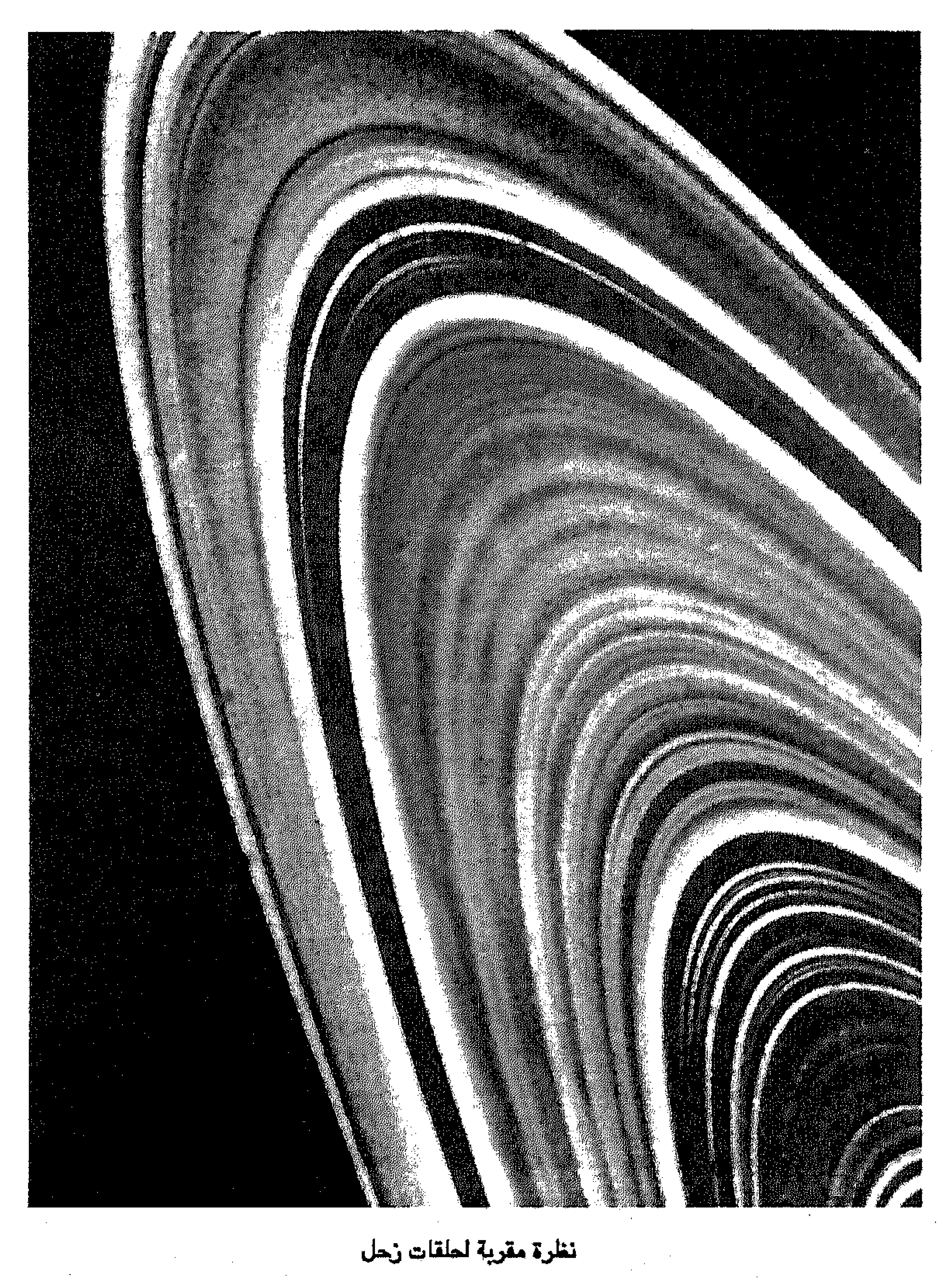
وطبقا لحسابات لاسكار فإن بقية الكواكب تبدو مستقرة من ناحية محور دورانها.

حلقات زحل

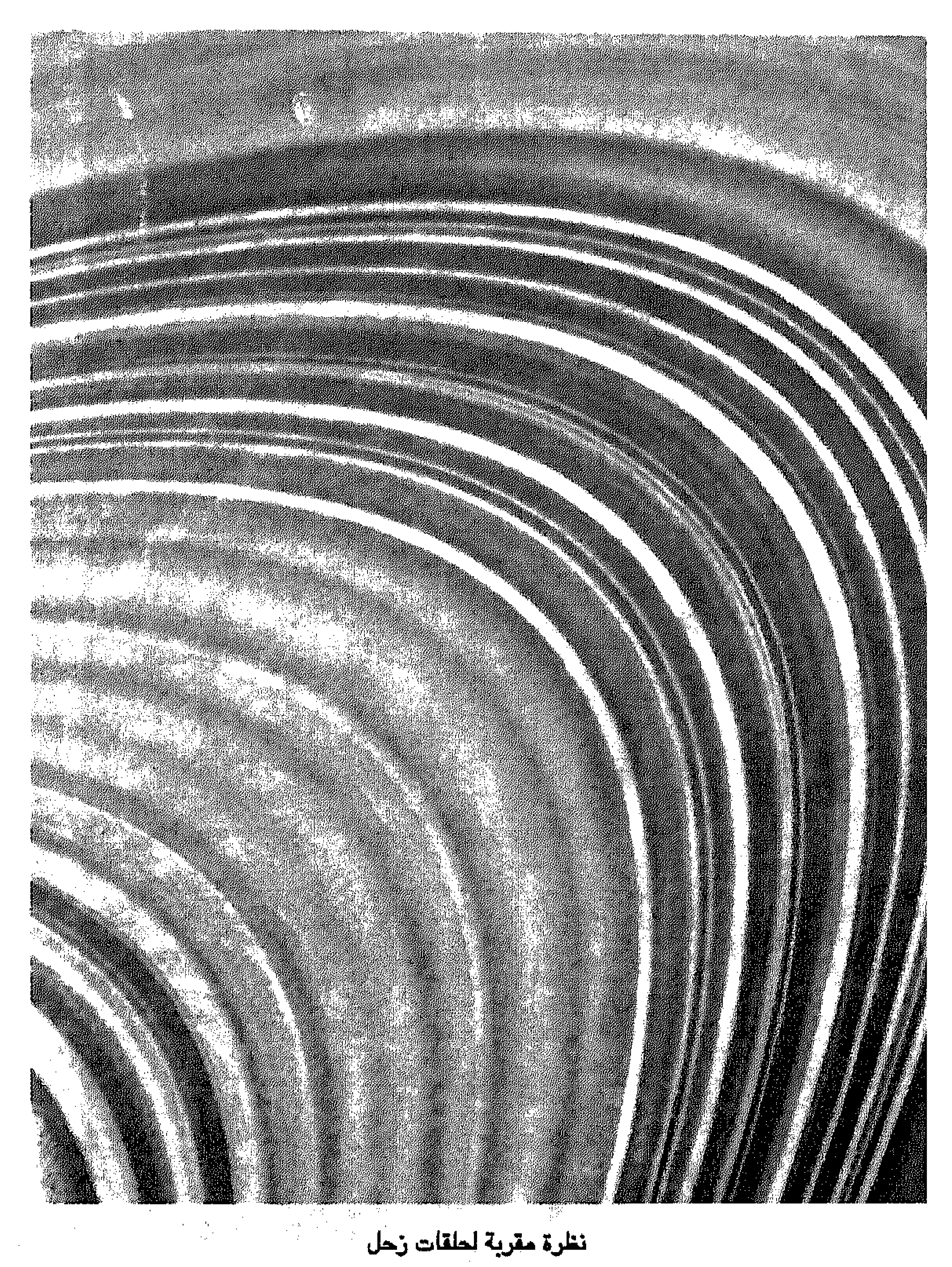
يعتبر كوكب زحل بحلقاته الجميلة المعقدة من أكثر الأشياء إثارة فى السماء، وتتشابه حلقاته بقدر كبير مع حلقات الكويكبات التى تساءلنا لتونا عن احتمال وجودها فى حالة هيولية. وكما هو الحال فى حزام الكويكبات، فإن بالحلقات فجوات أيضا، اثنان منها يمكن رؤيتهما من الأرض، فجوة كاسينى Cassini وفجوة إنك Enke. ترى هل هى نتيجة للهيولية؟ لم يتأكد من ذلك أحد بعد، ولكن الاحتمال قوى فى أن تكون حالة الهيولية قد لعبت دورا هاما فى تكوينها.



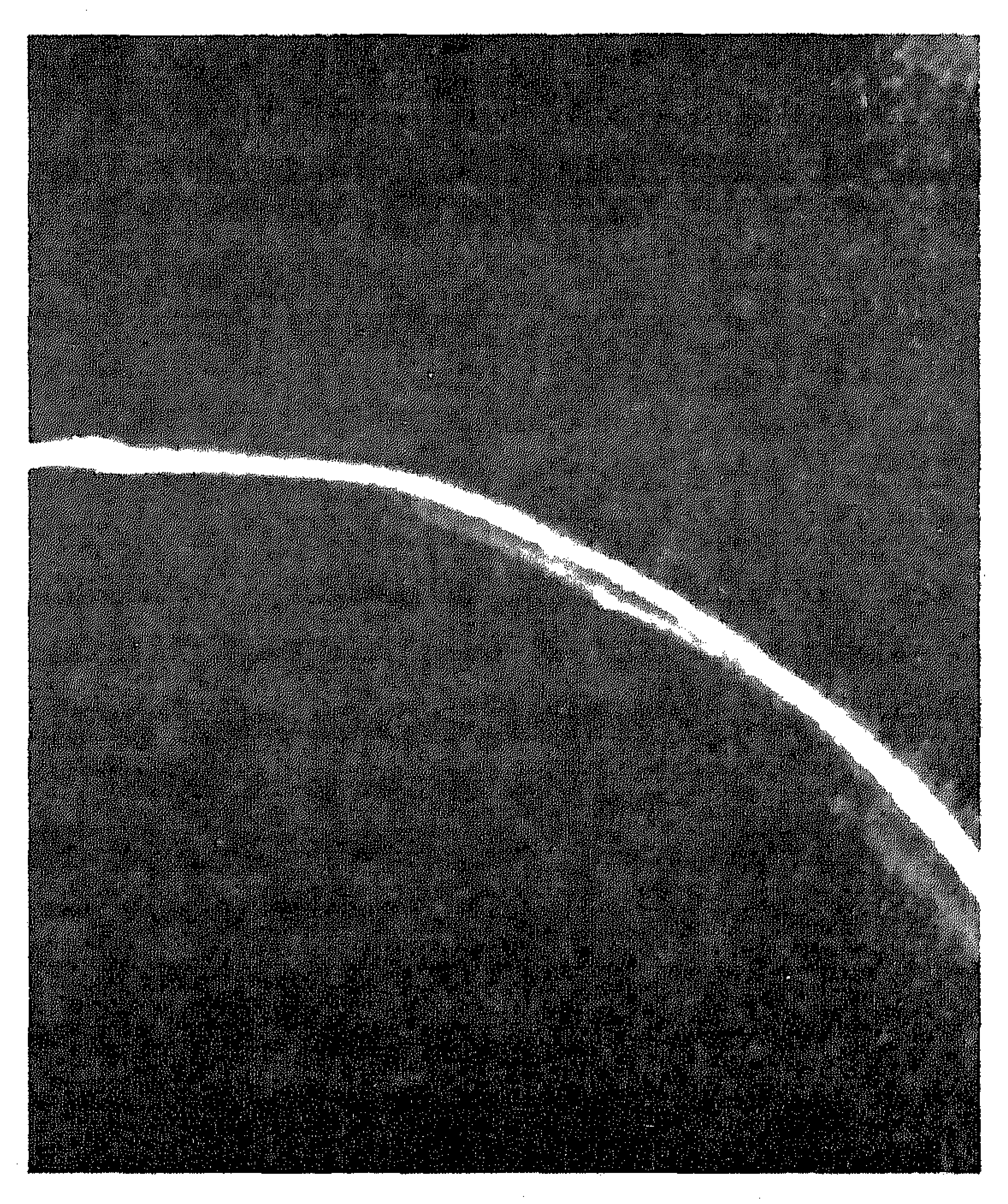
حلقات زحل مبينا بها المناطق المختلفة



نظرة مقربة لحلقات زحل



نظرة مقربة لحلقات زحل



المنطقة F ذات الجدائل

وتتميز هذه الحلقات بأنها ضيقة للغاية، فسمكها قد لا يزيد عن ربع الميل، وهى تتكون من صخور مغطاة بالجليد، ممتدة إلى ٤٦ ألف ميل عن الكوكب. ويمكننا من الأرض أن نرى ثلاث حلقات متميزة، يشار إليها بالحلقات A, B, C.وقد اكتشفت المركبة بايونير عام ١٩٧٩ حلقة جديدة وراء الحلقة Aمباشرة، سميت الحلقة .Fكما اكتشفت بعض الحلقات الضئيلة بعد ذلك بواسطة مركبات الفضاء.

وأكثر الحلقات لمعانا هى الحلقة B، والتى تمتد لمسافة ٢١ ألف ميل. ومكونات هذه الحلقة متجاورة بما يجعلها الأقل شفافية من غيرها. وعند الحافة الأبعد من هذه الحلقة تقع الفجوة كاسينى الممتدة إلى ٢٥٠٠ ميل. هذه هى الفجوة الأيسر رؤية من الأرض، ولكن وجه العجب فى ذلك أنها حين صورت بواسطة فوياجير اتضح أنها أبعد ما يكون عن كونها فارغة. إنها مكونة من العديد من الحلقات الأكثر ضآلة، مع احتمال وجود قمر بها.

وفيما وراء فجوة كاسينى تقع الحلقة A، وتحتوى على فجوة أصغر تسمى فجوة إنك تمتد تقريبا لمسافة ٢٤٠ ميلا ولمعانها يقع فى موقع متوسط بين الحلقتين A وC. وفيما وراء الحلقة A تقع الحلقة الضيقة المنعزلة F، والممتدة لمسافة ٦٥ ميلا. إنها الحلقة ذات التركيب المجدول، والذى يعتبر أكثر ما بثته فوياجير إثارة، حتى قيل إنه يتحدى قوانين الفيزياء. على أن تابعين سرعان ما اكتشفا، سميا بروميثوس Prometheus وباندورا Pandorea، عزى إليهما هذا التركيب العجيب للحلقة، فهما يجعلان الجزيئات ثابتة فى مكانها، ولذا يطلق عليهما أحيانا "التوابع الرعاة" the Shepherd satellites.

ومن أكثر اكتشافات فوياجير إثارة التركيبات التحتية الهائلة للحلقات، عشرات الآلاف من الحليقات (تصغير حلقات) متجمعة فى تجمعات لامعة وداكنة. كان الشيء المميز الوضوح فى كل ذلك هو وجود الموجات اللولبية للكثافة ١ density waves والتى يدل وجودها على مدى التفاعل التجاذبى بين هذه المكونات وهى تدور حول الكوكب، كل فى مداره الخاص به. إن هذا النظام الحلقى يشبه من نواح كثيرة صحيفة مطاطية، ثابتة فى مكانها، ولكنها تحتوى على صفحتها العديد من التجاعيد الصغيرة المتكونة نتيجة جذب الأقمار.

ولا تزال هناك العديد من الأسئلة حول الحلقات بحاجة للإجابة، وكما هو الحال فى مسألة الكويكبات، يحتمل أن يكون للهيولية دورا هاما فى تشكيلها. فسبب تكون فجوتى كاسينى وإنك لا يزال غامضا، وحيث إنهما يشبهان فجوات الكويكبات، فإنه من المحتمل أن يكونا بسبب الهيولية. ولكن لدينا أيضا سؤال آخر، ما هو مصدر الموجات اللولبية للكثافة؟ ما سبب استطالة مدارات بعض الحليقات؟ ما سبب حدة حواف النظام الحلقي؟ تكمن الإجابة بلا شك فى التفاعل بين التوابع ومكونات الحلقات.

فبدون الأقمار كان النظام الحلقى سيتبخر ببطء، فبعض المكونات كانت ستتجه للفضاء السحيق، والبعض الآخر كان سيتجه للكوكب ويكون جزءا من مكوناته. ولكن

من الواضح أن الحلقات قد ظلت باقية إلى ملايين السنين، وينتظر لها بالتالى أن تكون نظاما مستقرا، وأن الأقمار هى السبب فى هذا الاستقرار. فالحافة الخارجية للحلقة A مثلا مستقرة بفعل القمر ميماس Mimas. إن رنينا نسبته ٣:٢ قد تكون بين هذا القمر ومكونات الحلقة.

ويحتمل أن تكون فجوة كاسينى قد تكونت بفعل نفس القمر، فمكونات الحافة الداخلية فى حالة رنين نسبته ١:٢ معه، فهى تدور مرتين مع كل دورة لميماس. ولكن تفاصيل دوره فى تكوين الفجوة لا يزال غير واضح. ويمكن للتوابع بداخل الفجوات أن تقدم مساعدة هامة فى هذا الموضوع، بل إنه حتى قبل انطلاق المركبة فوياجير توقع البعض وجود توابع فى تلك الفجوات.

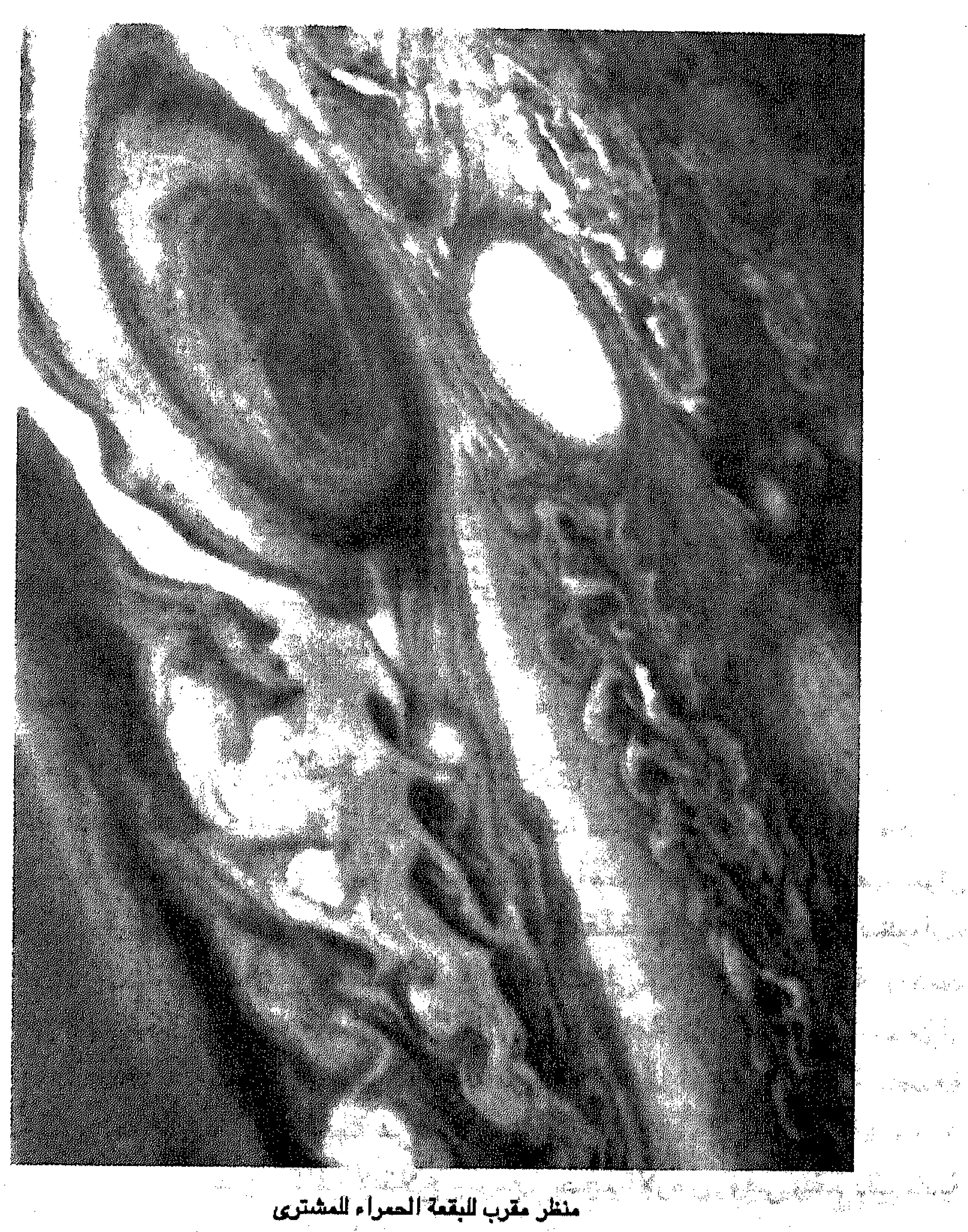
لقد استكشفت المركبة الفجوتين بعناية تامة، ولم يكتشف أى تابع قطره أكبر من سبعة أميال. على أن تحليل التركيب الحلقى يوحى بآثار لأقمار صغيرة، يمكن أن تكون المركبة قد أخطأتها، خاصة حين يكون القمر معتما.

وهناك احتمال أن يكون ميماس مسئولا أيضا عن تكون موجات الكثافة، فهو لا يدور حول زحل فى نفس مستوى الحلقات، ومن ثم يمكن أن يسبب جذبا طفيفا لمكوناتها، ولكن زحل يعيدها بطبعية الحال إلى موضعها، وفى هذه العملية يمكن لتلك الموجات أن تنبعث.

البقعة الحمراء الهائلة

يتعجب الإنسان حين يتطلع فى صورة المشترى لوجود بقعة برتقالية اللون على سطحه. لقد لوحظت هذه البقعة لثلاث قرون مضت، تحركت خلالها تحركا طفيفا، وتغير لونها تغيرا طفيفا، ولكنها بالقدر الأعظم ظلت راسخة فى لونها وموضعها طوال هذه القرون. وقبل إطلاق فوياجير كان مصدر هذه البقعة مثارا للعديد من النظريات، أغلبها من قبيل التكهنات. لقد ذهبت إحدى النظريات إلى أنها حمم متدفقة، وذهبت أخرى إلى أنها قمة عمود من الغاز، وثالثة إلى أنها فقاعة هائلة من الهيدروجين أو الهيليوم. لقد بدت تلك البقعة وكأنها عاصفة هوجاء، ولكنها لم تكن مثل أية عاصفة شوهدت على وجه الأرض. فمن جهة هى أكبر من الأرض ذاتها، إذ يبلغ بعداها ٨٠٠٠ ميل فى ١٨ ألف ميل، حجم كاف لابتلاع جرمين بحجم الأرض. وهى رغم ذلك بادية الرقة، قد لا يزيد سمكها عن ٣٠ ميلا.

وظنها البعض إعصارا هائلا، ولكنها تختلف عن الأعاصير فى أن الأعاصير تدور ضد عقارب الساعة فى النصف الشمالى من الكرة الأرضية ومع عقارب الساعة فى النصف الجنوبى منها. على أن البقعة تدور فى عكس هذا الاتجاه، فهى إذن إعصار مضاد.



منظر مقرب للبقعة الحمراء للمشترى

وكان الأمل قائما فى حل أغلب هذه الألغاز عند إرسال فوياجير، وقد كانت الصور التى بثتها المركبة جميلة حقا، بينت أن وسط البقعة هادئ نسبيا، وأن الاضطرابات تحدث عند حوافها. كما شوهدت نسخ من هذه البقعة على نطاق أصغر بالقرب منها. وعن طريق تعدد اللقطات أمكن للعلماء أن يأخذوا فكرة عن حركة هذه الاضطرابات. بدت أشكال ضئيلة بيضاوية بين ظهور واختفاء، وكان بالإمكان رؤية البقعة الحمراء تدور بسرعة حول محورها أشبه ببيضة هائلة تدور وسط المحيط. ولكن لماذا تظهر تلك الأشكال البيضاوية ثم تختفي، بينما البقعة ذاتها باقية عبر القرون؟ لقد أعطتنا فوياجير بعض الملامح، ولكنها لم تقدم إجابات شافية.

ولما كانت البقعة هى حركة غازية على نطاق ضخم، فإنها مثلت تحديا للمشتغلين فى ديناميكا الموائع ٢، كما أنها يمكن أن تنمذج حاسوبيا على صورة مائع، وكان فيليب ماركوس Phillip Marcus من جامعة كاليفورنيا من بين الذين قبلوا هذا التحدي. فبعد أن درس الصور بعناية قام بوضع بعض المعادلات على الحاسوب، متسائلا إن كان بإمكانه إنتاج بقعة كهذه على شاشة الحاسوب.

كانت الصور المنتجة بحق شبيهة بقدر كبير ببقعة المشترى، ونسخ ماركوس الصور على لوحات شفافة، ثم جمعها على شريط سينيمائي. كانت الألوان مبهرة بينما الدوامات تتغير وتتلاقى، البعض منها يفنى والبعض الآخر يستمر فى النمو، ثم بدأت الدوامة الهائلة تظهر وسط محيط هيولي، كانت نتاج عدة دوامات تداخلت فيما بينها، لتنتج دوامة مستقرة راسخة تتأبى على الفناء. كانت منطقة هيولية راسخة تشبه بقدر كبير بقعة المشترى الحمراء.

وتوالت الأبحاث مؤكدة تحليل ماركوس، مطبقة على تدفقات للموائع تدور معمليا فى دوامات وجد أنه من الممكن أن تنتج دوامات أكبر مستقرة كما هو الحال فى بقعة المشتري.

المذنبات

رأينا فيما سبق أن أحد الكويكبات القريبة من المشترى قد انتابته حالة الهيولية. ويؤثر المشترى أيضا فى العديد من المذنبات، ولهذا السبب فقد ثار التساؤل منذ وقت قريب حول احتمال وجود مذنبات فى حالة هيولية. وقد قام كل من ب. شيريكوف B. Chirikov وف. فتشسلافوف V. Vecheslavov من الاتحاد السوفيتى عام ١٩٨٧ بدراسة

المذنب هالي، وقاما بوضع نموذج حاسوبي لديناميكيته، ووجدا أنه يعاني من اضطرابات هيولة بسبب تأثير المشترى. هل يعنى ذلك أن هذا المذنب سوف يغادر النظام الشمسي؟ طبقا لحسابات العالمين ليس هذا متوقعا فى المستقبل القريب، فهو سوف يستمر فى زيارتنا لثلاثين مليونا تالية من الأعوام.

ودخل مذنب آخر بؤرة الأنباء مؤخرا، هو المذنب شوماخر-ليفى ٩، والذى تحطم على سطح المريخ صيف عام ١٩٩٤، وتبين الدراسات أيضا أن تصرفاته مشوبة بالهيولية، وهذا هو السبب فى الواقع فى أن يلقى هذا المصير.

قدمنا فى هذا الفصل المزيد من الأمثلة عن النظام الشمسي، وإن كانت التفاصيل لم تنته بعد للعديد من مسائله، ولكننا متأكدون تماما من دور الهيولية فى ذلك. على أية حال، إنها أرض خصبة للمزيد من الدراسات والأبحاث.

على أننا لم نتناول إلى الآن الكواكب فى حد ذاتها، هل هى مستقرة فى مداراتها؟ وعلى وجه العموم، هل النظام الشمسى برمته نظام مستقر؟ هذا ما نتناوله فى الفصل التالى.

(١) موجات الكثافة: هي نوع من الموجات يعتقد أنها تدور حول المجرات فتسبب تكون أذرعتها اللولبية، وهي تضغط المكونات الغازية معا في تلك الأذرع، مسببة تكون النجوم - المترجم (عن قاموس الفلك المصور، مكتبة لبنان)

(٢) كلمة "مائع" fluid تشمل السوائل والغازات معا. المترجم

الفصل الحادى عشر

هل النظام الشمسى مستقر؟

ظلت مسألة استقرار النظام الشمسى مؤرقة لأذهان الفلكيين لسنوات طويلة. ما الذى يخبئه له القدر على المدى البعيد؟ هل ستظل الكواكب فى مداراتها المنتظمة حول الشمس لعدة بلايين من السنين، أم ستؤدى التغيرات الطفيفة بها تدريجيا إلى الهولية؟ ولو أن هذه الحالة قد تحققت بالفعل، فأية عواقب وخيمة سوف تحدثها؟ هل ستنطلق الكواكب إلى الفضاء البعيد؟ هل ستتحول الأرض إلى مكان عدائى للحياة بسبب عصور جليدية أو كوارث أو موجات من المد هائلة؟ كما رأينا من قبل فإن العديد من علماء الفلك شغلوا أنفسهم من وقت مبكر بهذه القضية.

أول لمحة للهيولية

كرس بيير-سيمون لابلاس Pierre-Simon Laplace جزءا كبيرا من حياته فى دراسة استقرار الكواكب. وقد غاص بتمكن غير عادى فى ديناميكية مداراتها، وتمخضت مجهوداته عن خمسة أجزاء ضخمة معنونة "مقالة عن ميكانيكا السماء" Treatise on Celestial Mechanics، تعتبر موسوعة شاملة لديناميكية الكواكب كما عرفت فى وقته.

استخدم لابلاس طريقة الاضطرابات لحل مسألة حركة الكواكب، مبينا أن كواكب النظام الشمسى سوف تتحرك فى شكل شبه دوري. فحين يرسم فضاء الطور لمداراتها يكون على هيئة طارة. ولكن حل لابلاس كان على شكل متوالية (مثلا أ + ب + ج + ...).

وحتى يكون الحل مقبولا ومعبرا عن الاستقرار يجب أن تتقارب أعداد المتوالية، بحيث ينتهى مجموعها فى النهاية إلى عدد محدد. ولم يستطع أحد لعدة سنوات إثبات هذا الشرط.

ثم جاء بوانكريه، الذى بين أن المتوالية متباعدة فى غالب الأحوال، ويحدث ذلك حين تكون الأعداد فى تسلسل تصاعدي، بمعنى أن ب أكبر من أ، وج اكبر من ب، وهكذا. إن حاصل جمع متوالية كهذه يتزايد إلى مالا نهاية، فلا يكون حلا مقبولا. ولكن بوانكريه استمر فى طريقه، فأدخل مفهوم فضاء الطور، حيث يصور الحل كمسارات، ثم أتخذ الخطوة الرائعة بالقيام بأخذ مقاطع فى هذه المسارات، بدلا من التفكير فيها بأكملها. بهذه الطريقة وضع آساسا جديدا للنظر فى ديناميكية النظم، وهى الطريقة التى أظهرت له أول ملمح للهيولية. لا يبدو أنه تعرف على هذه الحالة، ولكنه آدرك أن شيئا ما يجعل الحل مستعصيا على الحل.

قليل هم من حاول الغوص فى الهوة التى كشف عنها بوانكريه. على أنه من القلائل ممن قاموا بذلك كان دافيد بريكهوف، والذى قدم عدة براهاين قاطعة لبعض تصورات بوانكريه، ونظر بعمق فى الكشف المذهل الذى توصل إليه. الأكثر من ذلك فقد كان أول من فكر فى خصائص الجاذبات وفئاتها. كما قام العالم السوفيتى فلاديمير أرنولد بمساهمة هامة فى هذه المشكلة، مبينا أن الظام الكوكبى الأمثل للاستقرار يتكون من عدة كواكب صغيرة الكتلة. ولكن نظامنا الشمسى لا يحقق للأسف هذا الشرط.

كانت النماذج الأولى تعتمد على المعادلات الجبرية، ولكن مع دخول الحاسوب فى المضمار بدأت النماذج الرقمية فى الحلول محلها. ظل الاحتياج للمعادلات قائما بطبيعة الحال، ولكن الحاسوب تولى القسط الأكبر من العمل. كان الحاسوب هو العصا السحرية التى أتاحت سبر غور المستقبل إلى ملايين من الأعوام.

ولكن ما الذى نتوقع أن نجد؟ من الواضح أن النظام الشمسى مستقر، فلا توجد شواهد ذات أهمية على كوارث خلاف ما صاحبت تكونه (العديد منها تبدو آثارها واضحة على وجه القمر). إن أى تغير لا بد وأن يكون تافها وعلى مدى طويل للغاية، بما يعنى احتياجنا للغوص فى المستقبل (وفى الماضى أيضا) لملايين السنين لكى نتتبع آثار مثل هذا التغيير.

ورغم كون الحواسب فى بداية عهدها قد مكنت من القيام بحسابات لم تكن متاحة قبلها، إلا أنها ظلت لا تفى بحاجة الفلكيين، فلم تكن بالسرعة التى تسمح بدراسة

تفصيلية للنظام الشمسي بأكمله. لهذا السبب انحصرت الدراسات في أجزاء من النظام، فكانت الدراسات الأولى خاصة بالكواكب الخارجية.

جهاز أورارى الرقمى

قبل حلول عام ١٩٨٣ كان الفلكيون يخططون لحوالى خمسة ملايين عام فى المستقبل. فى ذلك العام توجه مهندس الإلكترونيات جيرالد سوسمان من معهد MIT إلى كالتك فى إجازة دراسية. كان فى معهده يعمل بالحواسب وبرمجياتها ورياضيات الذكاء والتعلم، ولكن مع خلفية عريضة خارج تخصصه. ففى عام ١٩٧١ كان قد التحق ببرنامج دراسى عن ديناميكية النجوم والمجرات، اثرت شغفه بالفلك. كان مدرسه الار تومر Alar Toomre أستاذا متحمسا ذا ولع خاص بموضوع تصادم المجرات. فهو أول من وضع نموذجا حاسوبيا لهذه الظاهرة. كان من الطبيعي أن يصاب التلميذ بالعدوى من أستاذه.

كان التخصص الدراسى لسوسمان هو الرياضيات. ولكنه لم ينس أبدا أستاذه تومر، وذات يوم قرر أن يشبع شغفه بالفلك.

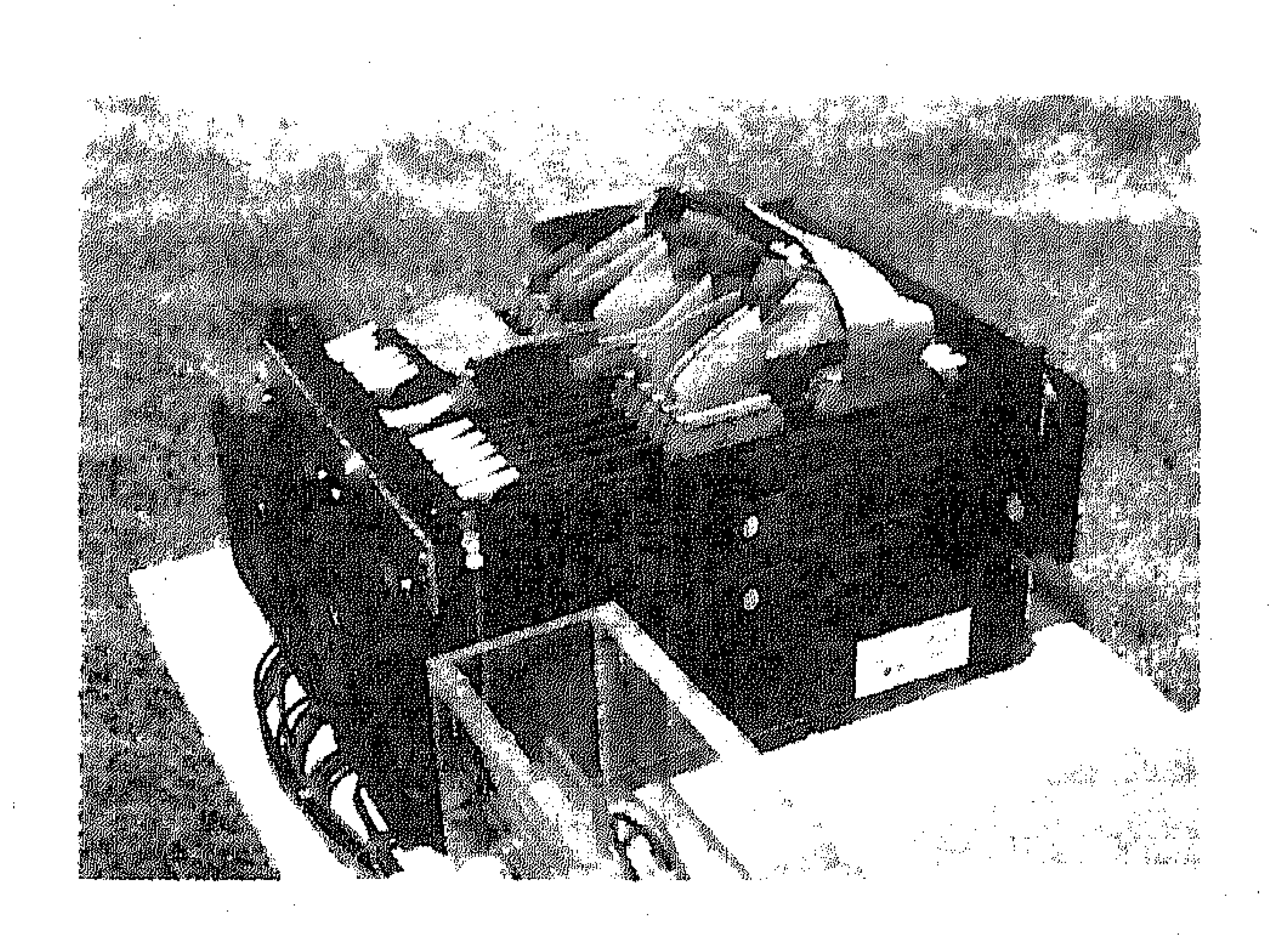
كان عمله بعد تخرجه فى التدريس بقسم الكهرباء والحاسبات فى MIT. وفى الثمانينات أصبح له الحق فى منحة دراسية. وتحت إلحاح الحنين للفلك الذى لم يفارقه يوما، ذهب إلى أستاذه السابق سائلا النصيحة، فنصحه بالتوجه لصديقه بيتر جولدرايخ Peter Goldreich فى كالتك، وهذا ما قام به سوسمان، وكان التخطيط للمنحة الدارسية لمدة عام.

كان جولدرايخ مهمتا وقتها فى ديناميكية مدارات كواكب المجموعة الشمسية، وقد انتهى تلميذه ويزدوم لتوه من دراسة حالة الرنين ١:٣ لحزام الكويكبات. وحين وصل سوسمان إلى كالتك كان ويزدوم قد حصل على عمل فى MIT واتجه لاستلام عمله..

اطلع سوسمان على أعمال ويزدوم، وأعجب بها أيما إعجاب، ولكنه كخبير فى الحواسب شعر بضيق إزاء أمر ما، درجة التقريب التى لجأ إليها ويزدوم. يقول سوسمان: "لم أكن متأكدا من درجة دقة العمل، وكان الحل الوحيد هو أن أعود لإجراء الحسابات بنفسي". ولكن الصعوبة كانت تكمن فى قدرة الحاسبات. فما كان منها يصلح لهذا الغرض هى الحاسبات فائقة القدرة، وهى عزيزة المنال بوجه عام بالنسبة لبحث تخصصى مستفيض. على أن سوسمان كان يتمتع بميزة خاصة، لقد قضى

أوقاتا طويلة فى تصميم وبناء أجهزة حاسوبية لمهام خاصة، وبإمكانه تصميم واحد لموضوع مدارات الكواكب، ليس هذا فحسب، بل يتسع أيضا للموضوع الذى كان فى ذهنه.

يقول سوسمان: "طلبت بعض الأصدقاء فى هيولت-بكارد، سبق أن تعاونت معهم فى إنجاز بعض المهام من هذا القبيل، فأخبرونى عن بعض الشرائح التى ظهرت مؤخرا والتى يمكن أن تفى بغرضي". وعلى ذلك فقد قام سومان مع مجموعة من زملائه، ستة فى العدد من تخصصات مختلفة جمعت بين الحاسبات والفيزياء النظرية، بتصميم ما أسماه "جهاز أورارى الرقمي". وتنسب أجهزة نمذجة النظام الشمسى والمسماة "أوراي" إلى أول من صمم نماذج ميكانيكية لهذا النظام، وهو إيرل أوف أورارى Earl of Orrery، البعض منها محفوظ فى المتحف البريطاني.



جهاز أوراري الرقمي

كان جهازا صغيرا، لا يزيد عن قدم مربعة، ولكنه بلغ فى القوة ثلث جهاز كراي، أقوى حاسبات عصره. وبعد الانتهاء منه عاد إلى MIT ليتعاون مع ويزدوم فى العمل. كان التعاون مثمرا بكل المعايير، فسوسمان لديه أقوى جهاز فى العالم مخصص للمهمة، وويزدوم لديه سنوات من الخبرة فى دراسة الموضوع.

كان المشروع الأول لهما هو إعادة دراسة حالة رنين ١:٣ لحزام الكويكبات. وفى لمح البصر كان أورى الرقمى قد حقق صحة نتائج ويزدوم السابقة، فانتقلا بعد ذلك إلى دراسة الكواكب الخارجية، من زحل إلى بلوتو، ولم تكن قد حظيت باهتمام كبير آنذاك. كانا يريدان تتبع مداراتها بأقصى ما بإمكانهما فى الماضى وفى المستقبل بحثا عن احتمال حالة هيولية. وغطت دورة العمل الأولى مليون عام من الماضى ومثلها فى المستقبل. كانت رحلة مثيرة مع الزمن، محبطة فى بعض أجزائها، ولكن طيبة بصورة غير عادية فى البعض الآخر. لم تبد أية علامة على هيولية بين الكواكب العملاقة، ولكن مدار بلوتو أنبأ عن بعض الأشياء المثيرة.

لبلوتو أكثر مدارات كواكب المجموعة استطالة، كما أنه يميل بزاوية غير عادية مع مستوى البقية من الكواكب مما يوحى بأمر لم يكتشف بعد. الأكثر من ذلك أنه يعبر مدار نبتون. فرغم أنه أبعد الكواكب عن الشمس، ويظل كذلك أغلب أوقاته، إلا أنه حاليا أقرب إليها من نبتون. وقد يبدو ذلك مثيرا لاحتمال تصادم بين الكوكبين، ولكن الأمر الغريب أن هذا لم يحدث. إن الكوكبين فى حالة رنين ٢:٣، مع كل ثلاث دورات لنبتون يتم بلوتو دورتين. لهذا السبب حين يعبر أحدهما مدار الآخر يكون الثانى فى أقصى الاتجاه الآخر بالنسبة للشمس.

كانت حالة رنين ٢:٣ معروفة من قبل، ولكن العالمان اكتشفا حالات رنين أخرى مثيرة. إن ميل مدار بلوتو مثلا يتأرجح بين ١٤,٦ درجة و١٦,٩ درجة فى فترة ٣٤ مليون عام. الأكثر أهمية هو وجود شواهد على أن هذا الميل هيولي. إن أسلوب الكشف عن حالة الهيولية هو بالمقارنة بحالة شبيهة، لا تختلف إلا بقدر طفيف فى الظروف الأولية، فإذا اختلفت النتائج اختلافا بينا دل ذلك على حالة الهيولية. هذا ما حدث فى حالة بلوتو. وكانت الحالة من الإثارة لدرجة أنهما قررا القيام بجولة أوسع نطاقا فى الزمن. ولكن صعوبة بدت فى الأفق، متعلقة بتقريب الكسور فى الحاسبات. إن البحث يتطلب العودة لنفس النقطة من الزمن عند التحول من الماضى للمستقبل أو العكس، وحين تطول الفترة يصعب تحقيق ذلك بسبب الحد الأقصى لتعامل الحاسوب مع الأعداد الكسرية.

كما أن خطأ آخر كان يعوق العمل، متعلق بتقسيم الفترة كلها إلى خطوات زمنية. لقد قررا فى البداية أن تكون الخطوة بطول أربعين يوما، وكنهما لاحظا أنه فى بعض

الفترات تتراكم الأخطاء فى اتجاه ما، وفى البعض الآخر تتراك فى الاتجاه الآخر. معنى ذلك أنه توجد فترة معينة يكون الخطأ فيها أقل ما يمكن. وبعد تجارب مضينية استغرقت عامين توصلا إلى أنه هذه الفترة هى ٣٢,٧ يوما.

يقول سوسمان عن هذه التجربة: "كان نوعا من التحليل عجيب لم يقم به أحد من قبل". الأكثر من ذلك أنه كان خاصا بذلك الجهاز وحده وطريقة تصميمه، لا علاقة له بالمسألة فى مضمونها. ولكن بالنجاح فيه أصبح الباب مفتوحا لرحلات أرحب فى الزمن. لقد استغرقت الرحلة السابقة ٢٠٠ مليون عام واستغرقت دورة الحاسوب شهرا لتنفيذها. أما الدورة الثانية فقد استغرقت خمسة أشهر، مغطية ٨٤٥ مليونا من الأعوام فى المستقبل. ورغم أن هذا الفترة لا تزال بعيدة عن تغطية عمر النظام الشمسي، إلا إن الإنجاز كان عظيما.

لم تتنبئ الأقام المخرجة من الحاسوب عن حالة هيولية فى هذه الدورة أيضا، فحتى مع طولها ظلت الكواكب الأربعة تدور فى سلاسة حول الشمس، ليس من تذبذب غريب ولا استطالة شاذة. كان من شأن هذه الدورة أن تكون بلا طائل لولا الكوكب بلوتو. لقد أتى الاندهاش الأكبر مرة أخرى من مداره، إذ اكتشفت عدة حالات رنينية جديدة ومثيرة. لقد وجد على الشكل الناتج دورات واضحة للتغيير مداها ٣,٨ مليون عام، و٣٤ مليون عام، و١٥٠ مليون عام و٦٠٠ مليون عام. رغم ذلك فإن بلوتو لم يظهر للوهلة الأولى هيوليا؛ فقد ظل فى مداره حول الشمس دون تغير ملحوظ فى استطالته. ولكن مع تدقيق النظر شوهدت أول ملامح الهيولية. فكما فعلا سابقا، بدآ دورة ثانية مع تغيير طفيف فى الظروف الأولية، وراقبا كيف تختلف النتائج.

تقاس درجة التباعد بين النتائج برقم يسمى "رقم ليبانوف" Lyapunov exponent، نسبة إلى العالم الرياضى الروسى أ. م. ليبانوف (١٨٥٩–١٩١٨) الذى كان أول من درس حالات استقرار النظم غير الخطية. إن قيمة الصفر لهذا الرقم تعنى الاستقرار فى حالة شبه دورية، وتعنى قيمة موجبة له أن المسارات التى تحت المقارنة تتباعد. تجد الفروق بين النتائج تزداد متضاعفة فى نفس الفترات، أو بمعنى أدق يزداد الفرق فى كل فترة عن الفترة السابقة بنسبة ٢,٧٢ (يعرف ذلك علميا بالزيادة الأسية). معنى ذلك أن قيمة موجبة لرقم ليبانوف تعنى حالة الهيولية. وجد العالمان أن هذا فترة التضاعف يحدث بالنسبة لبلوتو على فترات ٢٠ مليون عام، وهى فترة طويلة بالنسبة

لأعمارنا، ولكنها طرفة عين بالنسبة لعمر النظام الشمسي. هذا ما يجعلنا نتعجب من كيفية تمكن بلوتو مستقرا طوال هذا الزمن.

كيف يمكن لحالة الهيولية هذه أن تؤثر على مساره؟ على عكس ما يخطر ببالك، فهى لن تجعله يقوم بتصرفات شاذة، فهو لن يصطدم بنبتون (على الأقل فى المستقبل القريب) كما أن استطالة مداره على غرابتها لن تصبح عشوائية. لقد ظل بلوتو فى حالة الهيولية منذ نشأة النظام الشمسي، ومن المحتمل أن يظل على حالته للعديد من السنوات القادمة.

لا تعنى حالة الهيولية إذن كارثة محققة، ولكنها تعنى عدم إمكان دراسة البيانات بالنسبة لنظام ذى قيمة موجبة وكبيرة لرقم ليبانوف لفترات طويلة. ففى حالة بلوتو تعتبر كافة البيانات عنه قبل مائة مليون عام قد فقدت للأبد.

حينما تقابلت مع سوسمان سألته عن رد فعله حين اكتشف حالة الهيولية فى بلوتو فرد قائلا: "إن السؤال الجوهرى هنا هو "ترى هل سنصطدم به؟ وقد كان هذا هو رد فعلنا الأولي، ولهذا السبب تأنينا كثيرا قبل إظهار النتائج، فالطريق محفوف بالأخطاء من شتى الأنواع؛ أخطاء رقمية، وأخطاء فى عملية النمذجة، وأخطاء فى حسابات الرياضيين، وأخطاء لم تخطر على البال من قبل."

لقد تحول سوسمان الآن إلى مواضيع أخرى، ولكنه يعترف بأن هناك الكثير مما لا يزال مطلوبا فى ديناميكية النظام الشمسي، وكما وصف لى مشاعره خلال عمله فإنه كان متحمسا للغاية للموضوع، فقد كان يقول لنفسه دائما إن حياته قصيرة، ويجب أن يستغلها فى الاستمتاع بإشباع نهمه له.

وطبق برنامج ويزدوم وسومسمان على جهاز كراى فى جامعة لندن عام ١٩٨٩ بفترات تبلغ مائة مليون عام، ووجدوا العمالقة الأربعة الغازية مستقرة تماما، مع ملامح طفيفة لحالات هيولية.

أما آخر تشغيل لجهاز أوراى فقد تم عام ١٩٩٠، ويعتبر الزمن قد تجاوزه الآن بعد ظهور شرائح أسرع بكثير، وبقلب مفعم بالشجن والفخر أرسله سوسمان إلى متحف التاريخ الأمريكى فى واشنطون حيث يعرض حاليا.

كما قام ويزدوم عام ١٩٩١ بدورة تشغيل أخرى غطت فترة ١,١ بليون عام، مع التركيز على تصرف بلوتو. وفى هذا العمل تأكد بدرجة أكثر من صحة نتائج عمله السابق، ومن وجود حالة الهيولية بالنسبة لبلوتو.

لاسكار

بينما كان سوسمان وويزدوم مشغولين ببرنامجهما، كان جاك لاسكار من مكتب خطوط الطول بباريس يتعامل من المسألة من زاوية أخرى. كان اهتمام لاسكار الأساسى بالأرض، وكان يريد معرفة ما اعتارها من تغيرات فى الماضي، وما ينتظر لها فى المستقبل، وأثر ذلك على الطقس. وقد قرر لاسكار بعد حين أنه من غير المفيد الاستمرار فى الدراسة بالأسلوب التحليلى التقليدي. وقد قرر أن يتحول إلى ذلك إلى طريقة تقريبية تتلافى التغيرات الطفيفة، بما يمكنه من التركيز على التغيرات الجسيمة وطويلة المدى. ورغم ذلك فقد احتوت العلاقات التى يتعامل معها على ١٥٠ ألف متغير، وهو أمر لا يتصور فى تعقده.

وبسبب أسلوب لاسكار التقريبى فقد كان من المستحيل التعامل مع فترات قصيرة مثلما فعل ويزدم وسوسمان. وعلى ذلك فقد تعامل لاسكار مع فترات فى حدود ٥٠٠ مليون عام، واستطاع الخوض إلى مدى ٢٠٠ مليون عام، ليس للأرض فحسب، ولكن لكافة الكواكب عدا بلوتو.

حسب لاسكار رقم ليبانوف للكواكب، فاكتشف ملامح للهيولية فى النظام الشمسى برمته. إن كافة الكواكب، طبقا لحساباته، بما فى ذلك الأرض، عانت من حالة الهيولية. كانت النتيجة مفاجئة، لقد وجدت هذه الحالة بالنسبة لبلوتو، ولكن أن تكون لبقية الكواكب فقد كان هذا أمرا عجيبا.

لقد بين لاسكار أنه لو أن نموذج النظام الشمسى قد تغير بدرجة طفيفة، فإن تغير النتائج بينه وبين النظام المتخذ كأساس للمقارنة سوف يتضاعف على فترات ٣,٥ مليون عام. إنها فترة غاية فى الضآلة بالنسبة لعمر النظام الشمسى (تقريبا ٥ بليون عام)، ويعنى ذلك أنه على مدى فترات لا تزيد عن ١٠٠ مليون عام يختفى كل تماثل بين مستقبل النظام الشمسى وماضيه. لا يعنى ذلك أن النظام الشمسى فى خطر، فوقوع كوارث نتيجة لذلك أمر بعيد الاحتمال.

وتعرضت نتائج لاسكار لنقد شديد عند نشرها، ووجد نفسه مضطرا لتأييدها بالمزيد من البراهين. وكما علمنا فإن المسئول عن حالة الهيولية هى حالات الرنين، وقد بين لاسكار حالتين منها، الأولى بين الأرض والمريخ، والثانية بين عطارد والزهرة والمشترى.

التحقق من النتائج

ظلت نتائج لاسكار بحاجة إلى تأييد، أو على الأقل جزئيا. وقد أتى ذلك من مارتين دنكان من جامعة كوين بكندا. فقد قام دنكان مع فريق عمله بتشغيل برنامج شامل عن النظام الشمسي مختلف تماما فى أسلوبه عن الذى استخدمه لاسكار، أسرع تنفيذا وأكثر دقة وشمولا فى تمثيل الظواهر الديناميكية، بالإضافة إلى إدخال تصحيحات تتطلبها النظرية النسبية العامة. وتتيجة لتطور أسلوبهما فقد غطى البرنامج فترة ستة بلايين عام، ثلاثة من الماضى ومثلها من المستقبل. بالطبع لم تكن النتائج متماثلة، ولكنها أكدت ما قال به لاسكار من وجود حالتى الرنين.

وقد سألت دنكان إذا ما كان قد دهش لوجود حالة هيولية فى النظام الشمسي، فأجاب أنه فى ذلك الوقت كان الأمر متوقعا بعد نشر أعمال لاسكار، فلم تحمل النتيجة أية مفاجأة.

ثم وجه دنكان مع طالبه برت جلادمان اهتمامهما إلى الأماكن الخالية من الهيولية فى النظام الشمسي، لعل أن يجدا بها شيء من الكويكبات أو المذنبات لم يكشف عنه بعد. للقيام بذلك استخدما نموذجا يضم ٣٠٠ جرما اختباريا، شيء قريب مما فعل ويزدوم من قبل بالنسبة لحزام الكويكبات. كانت الأجرام عديمة الكتلة بحيث لا تسبب اضطرابا فى جيرانها، ولكنها كانت تتأثر بالمجال التجاذبى الذى تقع فيه. وكم كانت دهشتهما بالغة حين وجدا أن أغلب المناطق فيما بعد أورانوس تسودها الهيولية. إن مسارات نصف عدد الأجرام قد أصابتها فى خلال خمسة بلايين عام من الهيولية ما يكفى لطردها خارج النظام الشمسي. لم يكن برنامجهما من الطول لدرجة تأييد نتائج لاسكار تماما، ولكن هذه النتيجة كانت مؤيدة تماما لما ذهب إليه بالنسبة لهذه المنطقة من النظام الشمسي.

كان دنكان قد حصل على شهادته الجامعية من جامعة مكجريل، وشهادة الماجستير من جامعة تورنتو، وكان حصوله على الدكتوراه من جامعة أوستن حيث عمل

تحت إشراف كريج هويلر. كان موضوع الرسالة منصبا على قلب المجرة M87 لبيان ما إذا كان يضم ثقبا أسود.

يقول دنكان: "لقد كنت على الدوام شغوفا بمسألة مدارات كواكب المجموعة الشمسية، وكانت رسالة الدكتوراه منصبة على مدارات النجوم وعلى المجرات والثقوب السوداء، ولكن الأساس العلمى كان واحدا، ومن ثم فإن التحول إلى النظام الشمسى لم يمثل مشكلة بالمرة."

كان اهتمامه بالنظام الشمسى واستقراره ناجما عن اهتمامه بالمذنبات. ومن المعروف أن المذنبات تنشأ من منطقة على بعد سنة ضوئية من الشمس، تسمى "سحابة أوورت" Oort cloud. وقد اكتشف منذ وقت قريب حزاما داخل النظام الشمسى يطلق عليه "حزام كويبر" Kuiper belt، بالقرب مباشرة من نبتون. ويركز دنكان حاليا اهتمامه على دراسة كلتا المنطقتين.

الحاسوب "تولكت" فائق القدرة

ظلت مسألة التحقق من حالة الهيولية بحاجة إلى المزيد من البراهين. وقد جاء ذلك على يد ويزدوم وسوسمان عام ,١٩٩٢ لقد دفنا جهاز أوراى منذ فترة، ولكنهما أصبحا يحوزان حاسوبا فائق القدرة، أسمياه "تولكت" Toolkit. كان أسرع بخمسين مرة، علاوة على أنه قد صمم خصيصا للمسائل المتعلقة بالنظام الشمسي. لقد تطور الحاسوب تطورا كبيرا من بين الثمانينات والتسعينات، وأصبحت الأجهزة الصغيرة منه قادرة على نفس ما كانت تقوم به الأجهزة الضخمة قبل خمس سنوات فقط. لهذا السبب لم يكن "تولكت" أكثر ضخامة، وإن كان أكبر قدرة، لقد كان فى الواقع مكونا من مجموعة من ثمانية حواسب، مخصص كل حاسوب لدورة تشغيل مستقلة.

كان بإمكان ويزدزم وسومسمان بهذا الحاسوب القيام بتتبع مسارات تسع كواكب دون حاجة لتقريب كبير. كان نموذجهما مماثل بدرجة كبيرة لنموذج دنكان، عدا عدم أخذهما النظرية النسبية فى الحسبان.

بدأ كل حاسوب بنموذج مختلف اختلافا طفيفا عن غيره، وانطلقت المجموعة لمائة ساعة من العمل، بهدف تغطية مائة مليون عام من المستقبل. بهذا العمل المتزامن كانت مقارنة المسارات سهلة للغاية، وقد أنبأت بما لا شك فيه أنها متباعدة. لقد كان لاسكار على حق، فالنظام الشمسى فى حالة من الهيولية.

على أن العالمان اكتشفا رقمين من أرقام ليبانوف للنظام الشمسي، واحد لأربعة ملايين عام والآخر لاثنى عشر عاما. يبدو أن العمالقة الخارجية قد خضعت للرقم الأول طوال مائة مليون من السنين، ثم للثانى فى فترة الملايين الخمسة الأخيرة فقط.

ما معنى ذلك؟ إن الاستنتاج الذى خرج به العالمان أنه توجد آليتان مستقلتان لتوليد الهيولية فى النظام الشمسي.

وظهر بلوتو مرة أخرى فى حالة من الهيولية سيطرة فترة بين ١٥ و٢٠ مليون عام. ومن المثير أن يكتشف أن هيولية بلوتو مستقلة عن هيولية العمالقة الأربعة.

كانت التحقق من النتائج كشفا رائعا، لم يعد من شك فى الأمر بعد ذلك. فثلاثة مجموعات من العلماء، كل مجموعة بأسلوبها الخاص، قد بينت الهيولية فى النظام الشمسي. لا بد وأن للهيولية دورها فى تطور النظام. على أن ويزدوم وسوسمان كانا غير راضيين تماما، لقد كانا فى شك بالنسبة لمصدر حالتى الهيولية. لقد ذهب لاسكار إلى أن حالتى الرنين، واحدة بين الأرض والمريخ والأخرى بين عطارد والزهرة والمشترى هما السبب، ولكن العالمان الآخران لا يوافقان على ذلك، ويريان أن المصدر لم يثبت بعد. إن الأمر على خلاف حالة رنين ١:٣ التى ظهرت فى حالة حزام الكويكبات والقمر هايبريون، حيث تم التأكد من السبب بصورة قاطعة.

كما أن العالمان كانا يخشيان أن تكون الهيولية التى بدت فى النتائج هى حالة مصطنعة نتيجة النموذج الذى وضعاه، ولكن الاتفاق فى رقم ليبانوف بالنسبة لبلوتو مع الأبحاث الأخرى يضحد هذا الشك.

إلا أن الصعوبة الحقة تتمثل فى أنه إذا كان النظام الشمسى هيوليا تحت سيطرة فترة تضاعف بسيطة، فكيف لم تظهر هذه الحالة للآن؟ هل رقم ليبانوف ليس بالمعيار الجيد لتصوير الهيولية؟ إن هذا الرقم يقدر بخمسة ملايين فى بحث لاسكار وأربعة ملايين فى بحث ويزدوم وسوسمان، بينما ظل النظام الشمسى مستقرا لمدة خمسة بلايين عام. من الواضح أن المزيد من الدراسات أمر لا يزال مطلوبا، مع البحث عن أساليب أخرى لقياس حالة الهيولية.

مشروعات أخرى

قرر كل من مايرون ليكار **Myron Lecar** وفرد فرانكلين **Fred Franklin** ومارك موريسون **Mark Murison** من هارفارد-سميثسونيان **Harvard-Smithsonian** أن يبحثا

سبب عدم ظهور الهيولية رغم انخفاض رقم ليبانوف، فبحثوا حالة نظم بسيطة، مكونة من جرم واحد اختبارى يدور حول الشمس مع كوكب أو اثنين من الكواكب العملاقة، ثم أخذوا يقدرون زمن ليبانوف لكل حالة، وقارنوه بالزمن المطلوب لكى يعبر الجرم الاختبارى مدار الكوكب ويطرد خارج المجموعة الشمسية. فى كل مرة وجدوا أن الزمن المطلوب أكبر من زمن ليبانوف، وحين طبقوا ذلك على النظام الشمسى وجدوا أن زمن استقراره يصل إلى عدة تريليونات من الأعوام، أكثر بمراحل من عمره الواقعي.

ويعمل دنكان مع زملائه حاليا على مسألة متعلقة بالمذنبات، يأملون أن تلقى ضوءا على هذه المشكلة. تقسم المذنبات إلى مجموعتين، واحدة ذات مدارات طويلة والأخرى ذات مدارات قصيرة. وتنتمى المذنبات الآتية من سحابة أورت Oort إلى النوع الأول. وقد كان يظن أن المجموعة الثانية هى مذنبات من المجموعة الأولى، قصرت مداراتها بفعل كل من زحل والمشترى. ولكن الدراسات الحاسوبية بينت أن هذا ليس صحيحا على الدوام، وأن بعضا من المذنبات قصيرة المدارات يمكن أن يكون منشؤها منطقة داخل النظام الشمسي. وبالفعل كان العالم جيرارد كويبر Gerard Kuiper قد اقترح عام ١٩٥٠ وجود حزاما للمذنبات بالقرب من نبتون، تسمى حاليا حزام كويبر، وبينت حساباته قدوم مذنبات من هذه المنطقة. وقد أيدت الشواهد الحديثة هذا الافتراض بصورة حاسمة، إذ اكتشف فى هذا الحزام العشرات من الأجرام.

وانخرط دنكان فى دراسة هذا الحزام. إن فيضا من الأجرام يبدو أنه يتسرب منه، مما يوحى بوجود حالة من الهيولية تسوده. من جهة أخرى فإن العشرات من الأجرام ترى كل عام وهى تعبر الشمس، بينما تحتوى المنطقة على البلايين من الأجرام، ظلت هناك طوال عمر المجموعة الشمسية. إن هذا يدل على أنه بافتراض حالة هيولية هناك، فهى هيولية واهية.

يقول دنكان بهذا الخصوص: "إن الرأى الغالب هو وجود حالات رنينية لبعض أجرام حزام كويبر. وإن باستطاعتنا اليوم تتبع اجرام هذه المنطقة إلى بلايين السنين، بما يغطى عمر النظام الشمسى تقريبا. إننا نضع خرائط مسهبة التفصيل، ونبين أى المناطق مستقرة وأيها غير ذلك، ونتتبع الأجرام وهى تعبر نبتون متجهة للشمس. إننا نضع النماذج لنظم المذنبات فى النظام الشمسي."

ولم يعد مطلوبا القيام بذلك تلك الحاسبات الضخمة التى كانت فى الأيام الخوالي، فمحطات العمل الحاسوبية يمكنها أن تقوم بما كان يقوم به كراى وأمثاله فى ذلك

العصر. لكم كان هذا تسهيلا فى العمل. يقول دنكان: "كان بإمكاننا أن نحصل على موافقة بشراء سبعة محطات عمل دفعة واحدة، تعمل اليوم ليل نهار، وتقوم بمئات التجارب فى غضون أيام".

ويتطلع دنكان إلى تتبع النظام الشمسي، أو على الأقل جزء منه، إلى لحظة ميلاده، وهو يقول عن ذلك: "ليس بإمكانك حقيقة أن تدرس تاريخ النظام إلى منشئه، لكن بإمكاننا أن نضع النماذج التى تعين على ذلك." وقد ذكر أن لاسكر يرى أن عطارد قد يطرد من المجموعة الشمسية فى غضون خمس إلى عشر بلايين من السنين، ولكن الأمر يدفعه إلى المزيد من الدراسة.

ولا يزال أمام العلماء الكثير مما يقومون به، وقد بين دانكان بعض المسائل التى لا تزال تثير اهتمامه. ما هى تفاصيل تكوين حزام كويبر؟ ما هى أصل الكويكبات؟ ما هو تصرفها على المدى البعيد؟ هل كان للنظام الشمسى كواكب أكثر مما به اليوم؟ كيف تكونت الكواكب؟ من الواضح أن الهيولية قد لعبت دورا فى كل هذه الموضوعات، وهى موضوعات مفتوحة للدراسة للناس للسنوات القادمة.

رأينا فى هذا الفصل أنه مع اكتشاف الهيولية فى نطاق النظام الشمسى قد زالت صورته كنظام منضبط كالساعة. إننا ندرك الآن أننا نعيش فى نظام يحوطه التعقيد بدرجة لم نكن نتصورها من قبل. إن الهيولية قد أعطتنا صورة أكثر وضوحا عما يجرى فى الكون.

الفصل الثانى عشر

النجوم والمجرات

كما رأينا فالهيولية أمر شائع فى النظام الشمسي. على أن الفلكيين مدوا أبصارهم فى الفترة الأخيرة إلى ما هو أبعد، إلى النجوم والمجرات، حيث بدت ملامح الهيولية هناك أيضا. إن النجم فى أواخر أيامه تنتابه حالة من عدم الاستقرار، فيأخذ فى النبض. فجأة ينبعث الضوء منه كومضة خاطفة، ثم يخفت، فيتغير لمعانه بين بريق وإعتام. وفى أغلب الأحيان تكون النبضات منتظمة ودورية، ولكن فى أحيان أخرى تكون النبضات مضطربة. وفى أغلب حالات النجوم المتغيرة variable stars، كما تسمى هذه النجوم، يكون النبض منتظما، ولكن البعض منها قد أبدى شواهد فى الآونة الأخيرة على عدم انضباط. باختصار، إن هذه النجوم فى حالة من الهيولية. كما أن النماذج النظرية تبين أيضا أن مثل هذا الاحتمال قائم. بل أن التحول للهيولية يبدو واضحا فى بعض هذه النجوم، ذاك التفرع الثنائى الذى أشرنا إليه من قبل فى الفصل السادس.

وتجمعات النجوم أيضا، مثل المجرات، يمكن أن ينتابها الهيولية. فى هذه الحالة، كما فى حالة الكواكب، تظهر الهيولية فى مدارات هذه النجوم. لقد رأينا من قبل أن هينون قد وجد شواهد نظرية على وجود الهيولية فى التجمعات النجمية، ومن ثم فإن المجرات كانت مرشحا منطقيا للدراسة، وقد وجدت بالفعل ظواهر فى البعض منها.

الهيولية فى النجوم النابضة

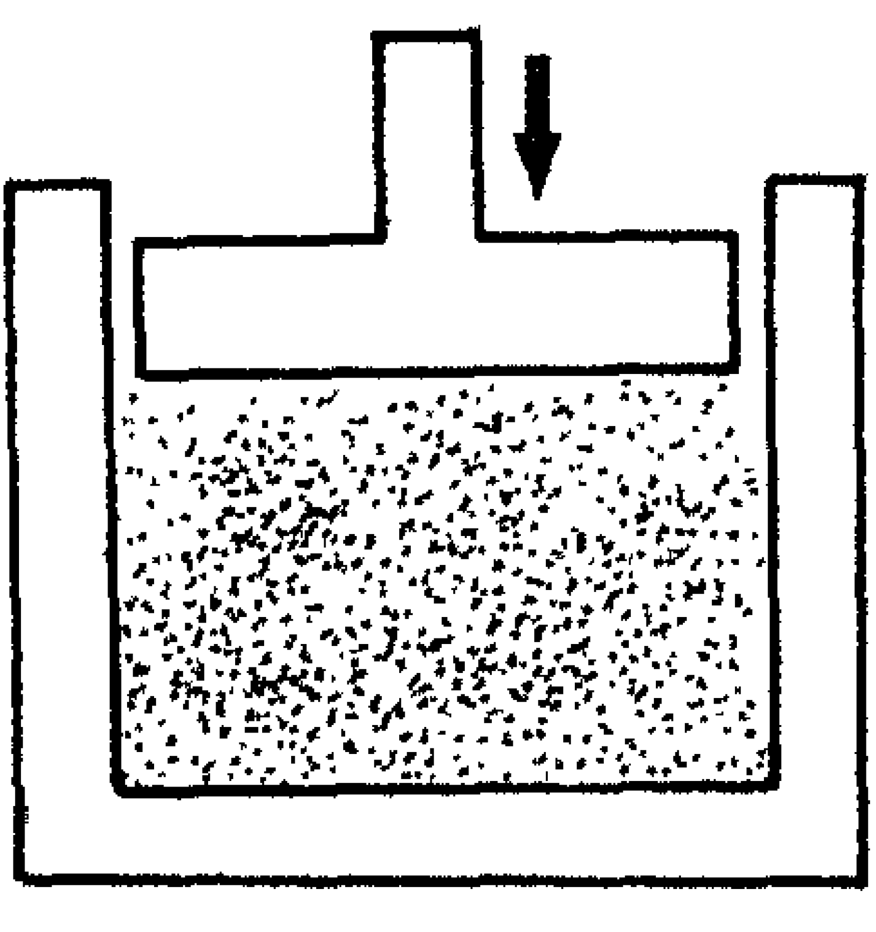
فى بحثنا عن الهيولية تعاملنا مع النظم غير التشتتية، وهى التى لا تشتت الطاقة، وهى نظم تظهر فيها الهيولية ولكن الجاذبات غير موجودة بها. ولكن النجوم النابضة، أى التى يتغير ضوؤها دوريا، هى نظم مشتتة للطاقة، وكما رأينا فى الفصل الخامس فإن الجاذبات توجد فى مثل هذه النظم. على ذلك فالبحث عن الجاذبات له أهميته، ليس فقط عن الجاذبات المعتادة، بل أيضا عن الجاذبات العجيبة، وهى التى تنتج الهيولية.

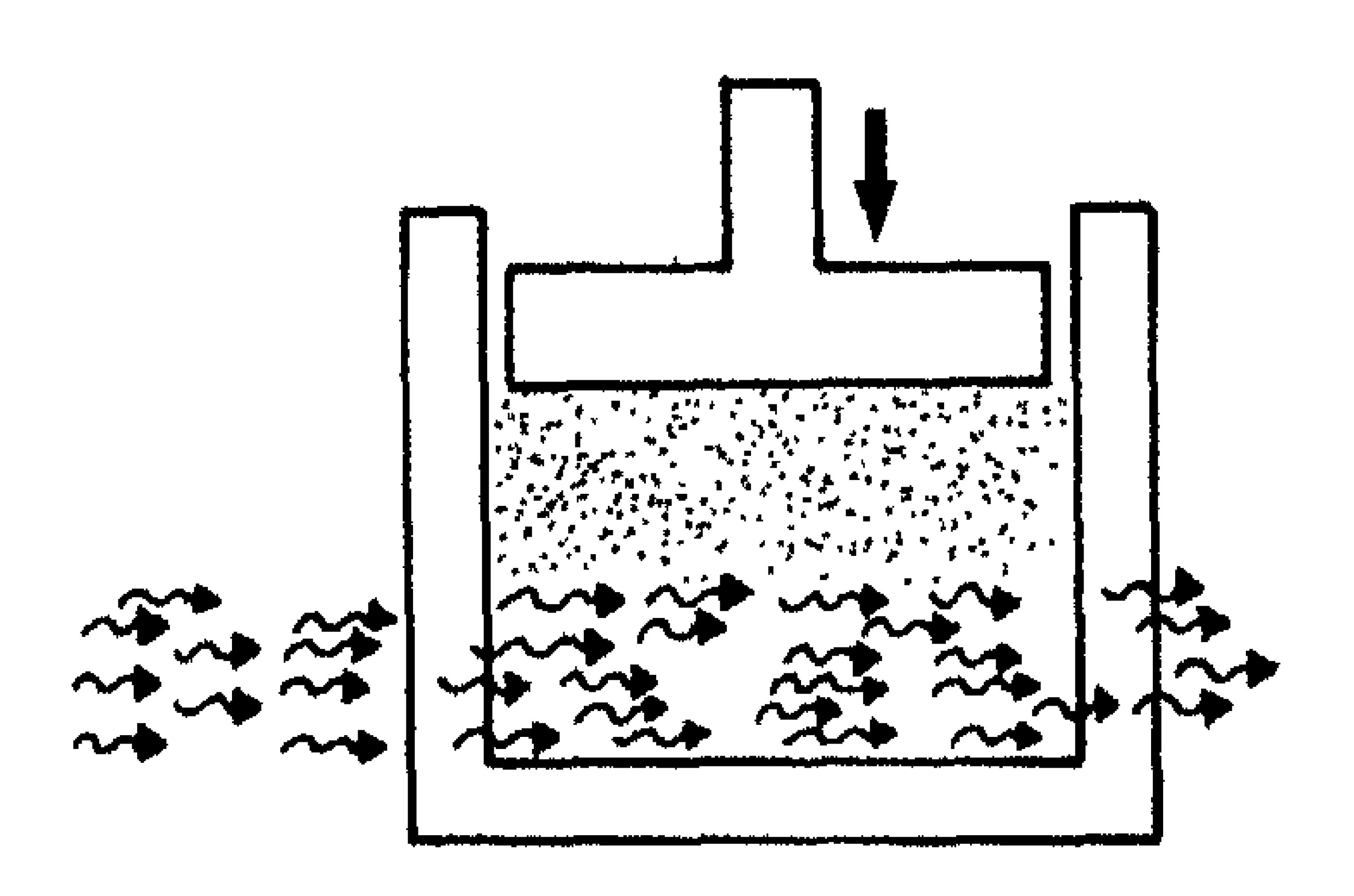
لكى نعرف سبب هذا الوميض فى ضوء النجوم يستحسن أن نبدأ بعملية تكوينها. تتكون النجوم من سحابة غازية من غازى الهيدروجين والهيليوم، مع احتمال وجود عناصر أخرى بكميات ضئيلة. فى البداية، تكون السحابة هائلة غير منتظمة، ولكن الجاذبية بين مكوناتها تحولها تدريجيا إلى الشكل الكروي. ففى المراحل الأولى من ميلاد النجم تتكون كرة ذات لون ضارب للحمرة، ولكن قلبها ترتفع درجة حرارته مع زيادة تكدس المادة به إلى أن تصل إلى ١٥ مليون درجة مئوية، فينشط به التفاعل النووي. يبدأ الهيدروجين فى القلب فى الاحتراق، متحولا إلى هيليوم، مغذيا النجم بالطاقة التى تحافظ عليه فى حالة اتزان. عند هذه المرحلة يتوقف انكماش النجم، حيث يحدث توازن بين قوة التجاذب إلى الداخل والضغط الناتج عن التفاعل النووى للخارج. بذلك تكون الكرة الغازية قد تحولت إلى نجم يمكن أن يظل على هذا الوضع ملايين أو بلايين من الأعوام، بحسب كتلته، يحرق وقوده النووى فى سلام دون أن يعانى أى تغير يذكر.

ولكن الرماد المتخلف عن حرق الهيدروجين، ألا وهو غاز الهيليوم، أثقل من الهيدروجين، فيتركز فى المركز من النجم، ويعانى أيضا من الانضغاط وارتفاع درجة الحرارة. وحين تصل درجة الحرارة إلى مائة مليون درجة تقريبا، يدب النشاط النووى فى الهيليوم أيضا، متحولا إلى ما أثقل منه من عناصر. وفى نجم متوسط الحجم كشمسنا يكون ذلك على صورة عنيفة للغاية تتسبب فى تفجير قلب النجم، يؤدى باحتراق الهيدروجين الذى يكون حادثا فى طبقات حول قلب النجم إلى أن ينطفئ، فيعتم النجم. على أن الهيليوم يعود إلى التكاثف بالتدريج، ليواصل الاحتراق فى سلام كما يحدث للهيدروجين حوله.

تكون النجوم فى غالب حياتها فى حالة اتزان بين الجاذبية بين مكوناتها وطاقة الاحتراق النووى التى تدفع تلك المكونات للخارج. ومع تناقص الوقود النووى بداخل النجم يختل التوازن فيحدث أحيانا أن يبدأ النجم فى النبض. لا يحدث هذا لكل النجوم، بل فقط للأكثر كتلة من الشمس بدرجة طفيفة. عند هذه المرحلة تجد النجم يتمدد وينكمش، فيزداد لمعانه عندما يتمدد، بينما يقل فى حالة الانكماش، يسمى النجم فى هذه الحالة نجما متغيرا. ويكون هذا التغير فى ضوء النجوم فى انتظام فى بعض الحالات وفى غير انتظام فى حالات أخرى.

تبسيطا لشرح حالة التغير فى ضوء النجوم نتصور نظاما مكونا من اسطوانة ذات مكبس ممتلئة بالغاز. فى حالة التوازن يكون ثقل المكبس إلى أسفل مساويا لضغط الغاز إلى أعلى. فإذا ما ضغطت المكبس عنوة ثم أرسلته، تراه يهتز حول نقطة الاتزان. لو تصورنا أنه لا يوجد احتكاك بين المكبس والإسطوانة، فإن الاهتزاز سوف يستمر للأبد، ولكن الواقع العملى هو أن حركة المكبس تخمد تدريجيا إلى أن يستقر عند نقطة الاتزان مرة أخرى.





تشبيه مبسط بحالة نجم، يبين الشكل السفلى الإشعاع الداخل والخارج من النظام

هذا بالضبط ما يحدث للنجم عند اختلال التوازن بين جاذبيته وضغط غازاته. وتشير الأبحاث إلى أن تذبذب النجم يخمد على مدى فترة بين ٨٠ و١٠٠ عام، طبقا لكتلة النجم. ولكن المشاهد أن أغلب النجوم المتغيرة فى السماء تنبض لفترات أطول من ذلك، وهو ما يوحى بوجود شيء آخر مسبب للنبض خلاف الآلية البسيطة التى شرحناها.

يعتبر السير آرثر إيدنجتون Arthur Eddington أول من تعرض لهذه المسألة بالدراسة، ولكى نفهم وجهة نظره نعود إلى مثالنا السابق. لنتصور أن النظام منفذ للإشعاع، بحيث يمكن للغاز أن يمتص طاقة إشعاعية من الخارج. فحينما يهبط المكبس يزداد انضغاط الغاز فتزداد كثافته. ومن خصائص الغازات أن معظمها تزداد قدرته على امتصاص الطاقة الإشعاعية عندما تزداد فى الكثافة. فبافتراض أن الغاز فى مثالنا من هذا النوع، فإنه بامتصاصه المزيد من الطاقة سوف ترتفع درجة حرارته، فيتمدد، دافعا المكبس لأعلى. ومع تمدد الغاز تنخفض كثافته، فتقل مقدرته على الدفع إلى أن يتوقف المكبس، فيعود هذا الأخير للهبوط، وتعود الدورة مرة أخرى، هكذا دواليك.

قد يكون لدينا نفس الموقف فى حالة نجوم ما. فى هذه الحالة يمثل التفاعل النووى فى قلب النجم مصدر الإشعاع. فحين تنكمش الطبقات الخارجية من النجم تزداد كثافتها فتمتص المزيد من طاقة التفاعل النووي، تاركة مقدارا أقل من إشعاع النجم للفضاء، فيخفت ضوؤه. ثم تتمدد تلك الطبقات بسبب ما امتصته من طاقة، فتنخفض كثافتها، ويقل امتصاصها للإشعاع المتولد عن التفاعل النووي، فزيداد الإشعاع الصادر من النجم للفضاء، فيزيد لمعانه فى السماء. وتتكرر هذه العملية دوريا كما بينا فى المثال التوضيحي.

فى أغلب النجوم النابضة تكون الدورية منتظمة، فيظل النجم بين لمعان وإعتام على مدى مئات أو آلاف من السنين. على أننا سوف نرى أن بعضا من هذه النجوم لا تومض بانتظام، بل تنتابها حالة من الهيولية أثناء وميضها.

والنجوم المتغيرة معروفة منذ القدم، وكان من أوائل من شاهدها جون جودريك John Goodricke، فلكى هاو لم يقدر له أن يعمر طويلا - إذ توفى عام ١٧٨٥ عن ٢١ عام. ورغم عاهة الصمم وقصر العمر فإنه قد قام بكشفين هامين، ففى عام ١٧٨٢ كان يراقب النجم "الغول" Algol، فلاحظ أنه متغير الإضاءة، فقام بتسجيل التغير فى ضوئه. ولكنه فعل ما هو أكثر من ذلك، لقد فسر هذا التغير بأنه النجم هو فى الواقع نجمان يدوران حول بعضهما البعض، وينخفض الضوء الصادر منهما كلما حجب أحدهما الآخر. وقد أيدت الأرصاد التالية هذا التفسير.١

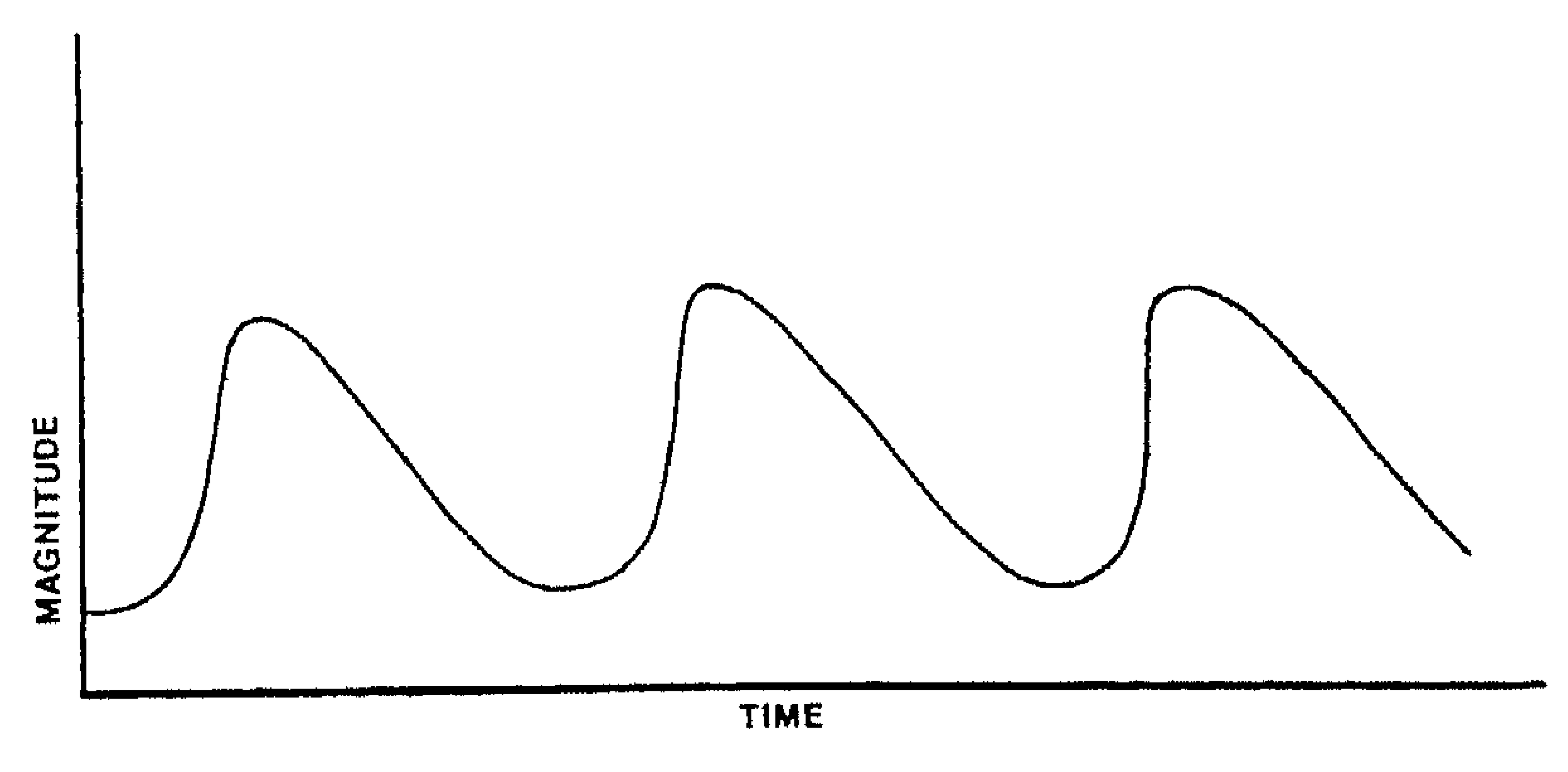
كما قام جودريك بمراقبة نوع آخر من النجوم المتغيرة، يوجد فى قلب كوكبة الدجاجة، يتغير لمعانه بصورة أبطأ من الحالة الأولى، ويسمى هذا النجم "دلتا قيفاوس"

delta Cephei. وقـد وجـد جودريك أن النجم يغير لمعانه بانتظام فى دورة مداها خمسة أيام، وأن ضوئه عند أوج لمعانه يبلغ مرتين ونصف المرة قدر ضوئه عند أدنى خفوت له. وقد بينت الدراسات التالية أن هذا النجم لا يتغير ضوؤه بسبب حجم نجم آخر له، بل يومض لنفس السبب الذى شرحناه آنفا، ويطلق عليها النجوم المتغيرة الذاتية intrinsic variabless.

والنجم "دلتا قيفاوس" هو أول ما رصد من هذا النوع من النجوم المتغيرة، والتى يطلق عليها "النجوم القيفاوية"، وهى تومض بدورة تتراوح بين يوم و٥٠ يوما. وتتميز هذه النجوم بسرعة ازدياد لمعانها فى مقابل بطء خفوتها، كما هو موضح بالشكل.

ولهذا النوع من النجوم أهمية كبرى لكونها يمكن أن تستخدم كمعيار للمسافة. فبُعد حشد نجمى أو مجرة مثلا يمكن أن يقدر لو أنه كان يحتوى على نجم قيفاوي، كل ما نحتاجه لذلك هو حساب متوسط اللمعان ودورة النبض. لهذا السبب لعبت هذه النجوم دورا هاما فى تاريخ علم الفلك. لقد اكتشفت العلاقة بين اللمعان والدورية عام ١٩١٢ بواسطة هنريتا ليافيت Henrietta Leavitt. تخرجت هنريتا – وهى ابنة رجل دين – عام ١٨٩٢ فيما يسمى الآن كلية ردكليف. وبعد تخرجها وظفها إدوارد بكرينج Edward Pickering فى مرصد هارفارد، وأسند إليها مهمة فحص اللوحات القادمة من موقع المرصد فى بيرو. كانت مهمتها الأساسية هى التعرف على النجوم المتغيرة، وتقوم بذلك بمقارنة اللوحات لعدة أيام متتالية. كان عملا مملا ضئيل العائد، بل لقد عملت لمدة فى بداية عملها مقابل لا شيء حقيقة.

كانت بعض اللوحات لزوج من المجرات الجنوبية غير المنتظمة تسمى سحابتى ماجلان. وبسبب قربهما النسبى – فهما يعتبران أقرب المجرات لنا – يمكننا تمييز نجوم معينة بها (ليس الحال فى أغلب المجرات). بدأت هينريتا فى التعرف على النجوم القيفاوية، ثم لاحظت أن الأكثر لمعانا هى الأطول دورية. ولما كانت هذه النجوم يمكن اعتبارها بقدر طيب من التقريب على نفس المسافة من الأرض، فإن العلاقة بين اللمعان والدورية تكون حقيقية. ونشرت هنريتا بحثها عام ١٩١٢, ولكن لكى يكون البحث نافعا، وتعمل هذه النجوم كمعيار للمسافة، يجب أن تقدر مسافة هذه النجوم على استقلال.



منحنى اللمعان لمتغير قيفاوى

وكان أول من قدر بحث هنريتا حق قدره هارلو شابلي Harlow Shapley من مرصد ويلسون. كان مهتما بحساب حجم وتركيب المجرة وموقعنا منها. وعن طريق بعض التقريبات كان قادرا على حساب أبعاد بعض النجوم القيفاوية فيها، ومن ذلك استطاع وضع المعيار المطلوب لعلاقة الدورية واللمعان. من هذه العلاقة بين أن الشمس ليست فى مركز المجرة كما كان يعتقد سابقا، ولكنها فى الواقع فى موضع خارجي بأحد أذرعها. وبعد ذلك استخدم إدوين هابل Edwin Hubble هذه العلاقة لتقدير مسافات بعض المجرات.

من الأنواع الأخرى للنجوم المتغيرة ما يسمى بالنوع "الشلياق ر ر" RR Lyra، وكما هو الحال بالنسبة للنجوم القيفاوية، فهى مسماة باسم أكثرها لمعانا، ألا وهى كوكبة ليرا. هذه النجوم تنبض بدورة أقل من يوم، والتغير فى لمعانها أقل مما للنجوم القيفاوية، فى المتوسط تبلغ العشر منها. هذه النجوم لا تتميز بعلاقة بين الدورية واللمعان كما للنجوم القيفاوية، ولكنها ذات لمعان ذاتى متماثل تقريبا، ومن ثم يمكن أن تستخدم أيضا كمعايير للمسافة. لمعرفة كيفية ذلك تصور حقلا يضم مصابيح كل مصباح له قدرة ١٠٠ وات، ولنفترض أننا نعرف بُعد أقرب مصباح. يمكننا فى هذه الحالة أن يعرف بعد مصباح أبعد من نسبة ما يصلنا منه من ضوء بالنسبة لضوء النجم الأقرب. ينطبق نفس القول على هذا النوع من النجوم.

من أنواع النجوم المتغيرة أيضا النوع الضخم الأحمر، والذى يطلق عليه "ميرا" Mira، أو "نجوم ميرا العجيبة" كما كانت تسمى قديما. هذه النجوم أضخم من النوعين

السابقين، وأطول فى فترة الدورية، وأيضا فى التغير فى درجة اللمعان، فهى يمكن أن تختفى لعدة شهور، ثم ما تلبث أن تكون من أضوء نجوم السماء. وتتراوح فترة الدورية لهذه النجوم ما بين ٥٠ و٧٠٠ يوما.

هذه هى الأنواع الأساسية للنجوم المتغيرة، ولكن توجد أنواع أخرى، منها نوعان لهما أهمية خاصة من وجهة نظر الهيولية. أحد هذين النوعين يعتبر فئة جزئية من النجوم القيفاوية، يطلق عليها أحيانا النجوم القيفاوية ٢ Cepheids II. ولكنها غالبا تعرف بنجوم العذراء "و" W Virginis. تختلف هذه النجوم عن النجوم القيفاوية العادية فى كونها أقدم عمرا، وأن منحنى تغيرها مختلف إلى حد ما. النجوم الأعتم منها لها دورة واحدة، ولكن الأكثر لمعانا قد يكون لها أكثر من دورة، وهو ما يجعل لها تلك الأهمية الخاصة بالنسبة للهيولية.

وأخيرا لدينا نجوم الثور ر ف RV Tauri. هذه النجوم تنتمى أيضا للنجوم القيفاوية، وتختلف عن المعتاد منها فى عدم انتظام دوريتها. إنها نجوم متغيرة شبه منتظمة (أو نصف منتظمة) simiregular variables.

ويمكن تشبيه نبض النجوم المتغيرة باهتزاز قضيب معدني، أو أرجحة بندول. وكما رأينا سابقا توجد أساليب للبحث عن الجاذبات فى علاقة بين التغير والزمن لهذه الأشياء، على غرار ما عرضناه من تجربة الصنبور لجماعة سانتا كروز.

وباستخدام العلاقة بين اللمعان والزمن يمكننا أن ننشئ فضاء الطور لنبحث فيه عن معالم لجاذب عجيب. والأكثر من ذلك يمكننا أن نأخذ مقاطع بوانكريه، فهذه الأساليب موحدة بصرف النظر عن مجال تطبيقها.

كان أول من بحث عن الهيولية فى النجوم النابضة هو روبرت بتشلر Robert Buichler من جامعة فلوريدا. ولد بتشلر فى لوكسمبرج، ووصل الولايات المتحدة حيث عمل فى مسألة الأجرام المتعددة تحت إشراف كيث بروكنر Keith Bruckner فى جامعة فلوريدا. وفى بحثه طبق أساليب الأجرام المتعددة على موضوع المادة المتكدسة، وتفجر اهتمامه بالفلك بعد تخرجه حين طبق أسلوب المادة المتكدسة والأجرام المتعددة على النجوم النيوترونية.

يقول عن نفسه: "حين بدأ شغفى بموضوع الهيولية أخذت أقرأ عنه، وكنت واثقا من إمكانية تطبيقه على النجوم." كانت أغلب أعماله نظرية، يضع النماذج الحاسوبية

للنجوم المتغيرة ويحاول أن يعرف تحت أية ظروف تدخل حالة الهيولية. ولكنه بذل أيضا مجهودا فى محاولة التعرف على ملامح هذه الظاهرة فى النجوم بناء على ما يجمع من بياناتها.

وبالضبط كما فعل فايجنباوم حين بين أن تضاعف الفترات هو الطريق للدخول فى الهيولية، بين بتشلر أن ظاهرة مماثلة تحدث للنجوم، "حين تغير من معامل ما، مثل درجة حرارة السطح، وتتابع التغير فى دورية النبض ترى أنها تتغير تدريجيا. إنها تتغير من الدورية الثنائية إلى الرباعية ثم إلى الهيولية."

وانصب اهتمام بتشلر بصفة خاصة على نجوم العذراء "و" والثور "ر. ف." وقد بين فى بحث نشره بمشاركة جيزا كوفاكس Geza Kovacx عام ١٩٨٧ أن النماذج الحاسوبية لهذه النجوم تبين سلسلة من تضاعف الفترات مع تغير درجة حرارة سطحها وهى تتحول إلى الهيولية. ويعتقد أن السبب المحتمل للهيولية هو الرنين فى النبضات، مثل الرنين الذى صادفناه سابقا فى النظام الشمسى.

وقد سألت بتشلر عن مدى توافق نماذجه مع الملاحظات الفعلية، فرد بعد تردد: "توجد بعض البيانات، ولكن البيانات المناسبة ليست متيسرة الحصول عليها. ففى خلال الستة أشهر السابقة حللنا بيانات عدد من النجوم "الثور ر. ف."، وقد وجدنا بعض الشواهد على الهيولية."

كان بتشلر يشير إلى نجمين هما ر. سكوتي R. Scotti وAC Hercules، ففى عام ١٩٩٤ طبق بتشلر وفريق عمله بيانات تعود إلى ١٥ عاما عن النجم الأول و١٢ عاما عن الثاني. وقد تبين أن ديناميكية النجم الأول يمكن أن توصف عن طريق هيولية من البعد الرابع، أما أبعاد هيولية النجم الثانى فغير مؤكدة، تبدو وكأنها بين ثلاثة وأربعة.

وقد قام مؤخرا كل من ف. إيك V. Icke وأ. فرانك A. Frank و أ. هسك A. Heske من هولندا بدراسة النجوم الضخمة الحمراء طويلة الدورية، حيث حاولوا أن يعللوا سبب عدم الانتظام (واحتمال الهيولية) بالنظر فى طبقاتها الخارجية، وكيف تستجيب للنبضات التى تنشأ فى الطبقات الداخلية غير المستقرة. وبتوقيع البيانات على فضاء الطور وتفحص مقاطع بوانكريه بينوا أن حالة الهيولية تتحقق على مدى واسع من تغير المعاملات. كما قالوا بوجود تطابق بين نتائج أبحاثهم والملاحظات الواقعية.

الهيولية فى النجوم التراكمية

تمثل النجوم المتغيرة مرشحا قويا لحالة الهيولية، ولكن يوجد نوع ثان من النجوم مرشحة أيضا لذلك، ألا وهى النجوم السينية (التى تبث الأشعة السينية) المضطربة الإشعاع. وقد اكتشف العديد من هذه النجوم بعد إطلاق القمر أوهورو UHUUERU المخصص للرصد السيني. أحد هذه النجوم هو النجم هرقل س-١ Her X-1 والذى عرف بعد ذلك أن نجم ثنائى يتكون من نجم نيوترونى يدور حوله مرافق على صورة قرص تراكمي.

تكون الإشارة المنبعثة من ذلك النجم على شكل ومضة مدتها ١,٢٤ ثانية، ولكن يلاحظ أيضا بعض النبضات بدورات أخرى مضافة إلى هذه النبضة، وعلى الأخص دورة قوامها ١,٧ يوما تشير إلى أن النجم مقبل علينا تارة ومدبر عنا تارة أخرى. يشير ذلك إلى الدوران حول شيء آخر - حول نجم.

كما يوجد أيضا شواهد على حالة كسوف، فكل ١,٧ يوم يختفى الإشعاع السينى لفترة خمس ساعات، مشيرا إلى أن النجم يتحرك أمام مصدر الأشعة السينية فيقطع استقبالها. بالإضافة إلى ذلك فإن استقبال الأشعة ينقطع كل ١٢ يوم لمدة ٢٣ يوما.

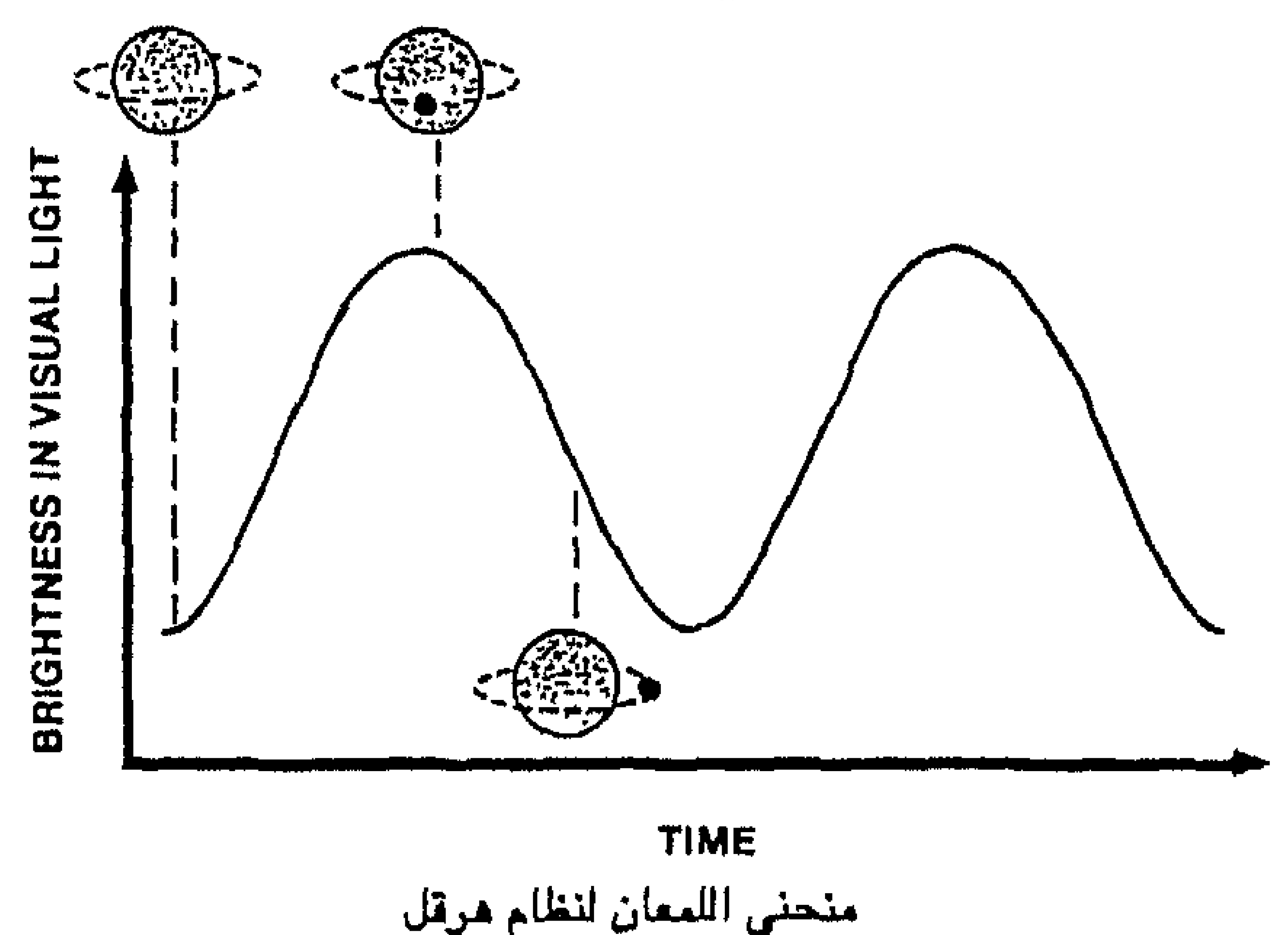
وما أن اكتشف النجم هرقل س-١ حتى بدأ البحث عن رفيقه. قبل ذلك بثلاثين عاما اكتشف نجم اعطى اسم HZ Hercules وصنف على أنه نجم مجهول، ولكن بدأ بعض الفلكيون يوجهون عنايتهم له بسبب قربه من النجم هرقل س-١، ترى هل هو الرفيق المجهول؟ وحين وجد أن دورته هى ١,٧ يوم، وأنه يكون فى أقل لمعانه عند اختفاء الأشعة السينية، قوى الاعتقاد بأنه بالفعل الرفيق الذى يبحث عنه للنجم Her X-1.

وبسبب تعقد التغير فى سلوك هرقل س-١ اهتم البعض باحتمال وجوده فى حالة من الهيولية. وكان فريق من معهد ماكس بلانك بألمانيا أول من بحث هذا الفرض بتطبيق أسلوب الجاذب العجيب بحثا عن ملامح له هناك، وأعلنوا عام ١٩٨٧ عن اكتشاف جاذب ذى بعد بين ٢ و ٣، أى بعد كسري، ومن ثم فهو جاذب عجيب. وشجعهم هذا البعد المنخفض على وضع نموذج حاسوبى بسيط للنجم.

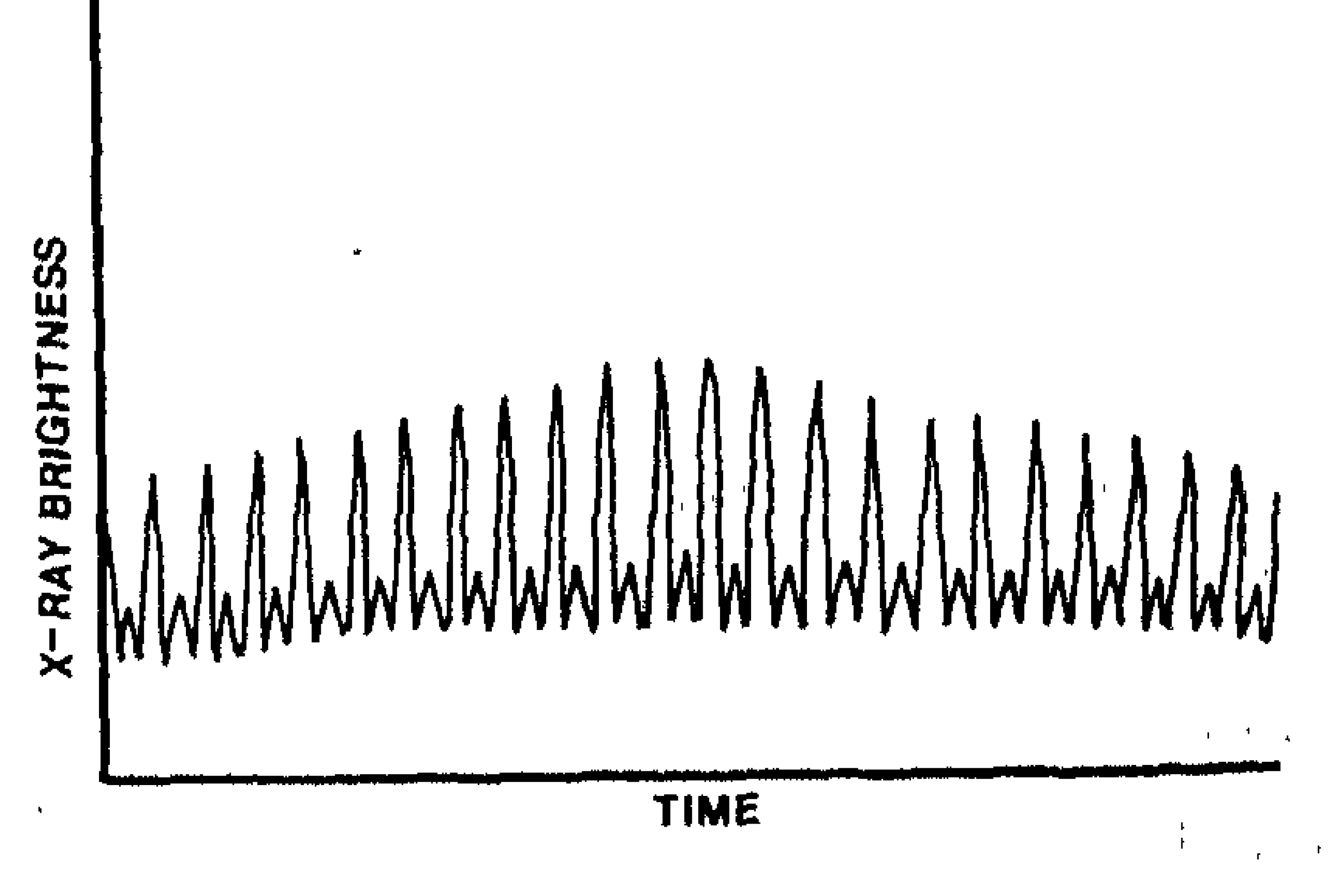
واسترعت جهودهم اهتمام جاى نوريس Jay Norris من معمل Naval Research Laboratory وتارى ماتيلسكي Tarry Matilski من جامعة روتجرز Rutgers، وقد كانا يبحثان فى موضوع الهيولية. يقول ماتيلسكي: "كنا نستخدم نفس الأسلوب حين عثرنا على

بحث الألمان، وبعد قراءته أيقنت أنه يتضمن شيئا يمكننا تنفيذه. لقد رسمنا موجة جيبية، ثم أخذنا نضيف إليها بعض التداخلات هنا وهناك، إلى أن توصلنا إلى إنتاج نفس النتائج التى توصلوا إليها دون أية بيانات عن مصدر الإشعاع السيني. إن مضمون نتائجنا أنه يجب الحذر عند التعامل مع موضوع الجاذبات، حيث إن بعض الإشارات قد تعطى تشابها بها" باختصار، لقد بينوا أن الألمان لم يعثروا على جاذب عجيب.

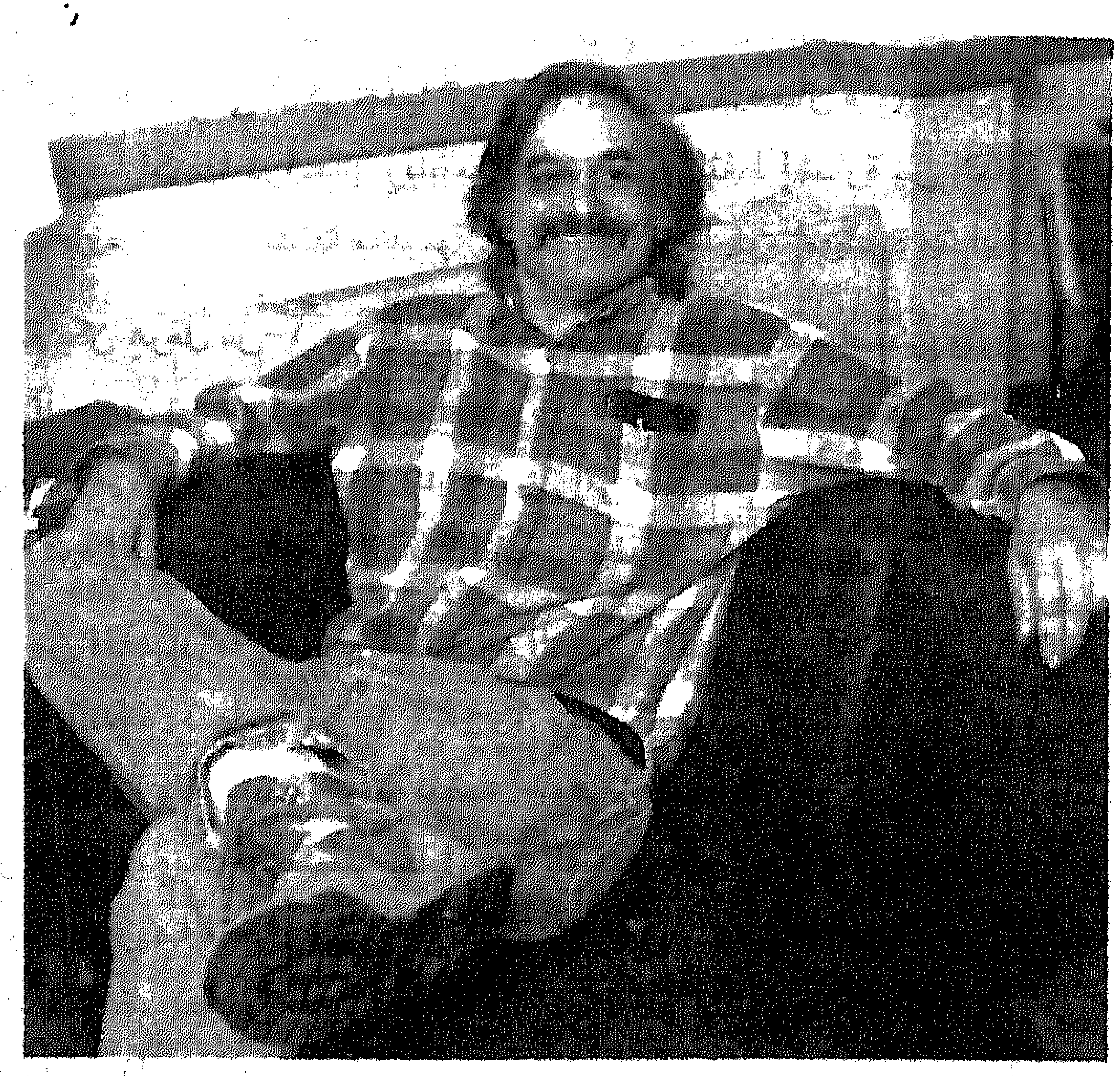
والشوشرة المتداخلة مع الإشارات هى مشكلة قائمة، ولكى تأخذ فكرة عنها ضع مؤشر المذياع فى موضع لا يلتقط أية محطة، ثم ارفع ضابط الصوت إلى أقصى مداه. إن الهمس الذى تسمعه هو هذه الشوشرة، تنتج عن الأجهزة الإلكترونية لجهازك. ومن السهل أن تتبين أن هذه الشوشرة عشوائية.



منحنى اللمعان لنظام هرقل



شكل بيانى للإشعاع السينى مقابل الزمن للنجم Her X-1



تيرى ماتيلسكى

تولد الاهتمام عند ماتيلسكى بالهيولية من خلال حديثه مع فايجنباوم الذى يمت له بصلة قرابه. ويقول ماتيلكسي: "كنا على اتصال دائم، وكان يحدثنى دائما عما يتوصل إليه." أما اهتمامه بالفلك فيعود إلى فترة شغفه بالتصوير الضوئي. فذات يوم رأى بعض الصور فى مجلة للفلك، فقرر أن يبنى تلسكوبا ويرى إذا كان بإمكانه التقاط مثل هذه الصور، وقد فعل. وخلال فترة دراسته الجامعية كان يطلق الصواريخ ويحلل أطياف التردد العالى القادمة من النجوم الساخنة، وبعد تخرجه ساهم فى بناء أول قمر صناعى للفلك التلسكوبي، القمر أوهورو.

ويستطرد ماتيلسكي: "لم يكن إثبات عدم وجود جاذب عجيب فى النجم هرقل س-١ نتيجة مفرحة، ليس كاكتشاف وجود واحد منها. على أن هذا النجم لا يزال مثيرا، كما أننى على يقين من وجود غيره يتضمن سلوكه مثل هذه الجاذبات.

ويرى ماتيلسكى أن مشكلة الشوشرة يجب أن تحل قبل البحث عن الجاذبات، ويقول عن ذلك: "إننى أفكر جديا فى هذه المشكلة، فأعمال فايجنباوم تقف على أرض أكثر رسوخا لكونها دراسات رياضية، ولكن حين تلتقط إشارة من العالم الواقعى عليك أن تتساءل عن مدى شدتها بالنسبة لما قد يصاحبها من شوشرة متداخلة معها".

لم يكن هرقل س-١ هو النجم الوحيد الذى درسه ماتيلسكى ونوريس، فقد درسا أيضا النجمين Circ X-1 والعقرب س-١ Sco X-1. وفى كل حالة كانت الشوشرة مشكلة عويصة. وفى نفس الوقت لجأ ماتيلسكى إلى سياسة بناء حاسوب خاص بدراساته، ليعطيه قوة الحاسبات الضخمة بتكاليف بسيطة.

ومن المصادر الأخرى للإشعاع السينى الذى أثار اهتماما بالغا فى قضية الهيولية النجم دجاجة س-١ Cyg X-1، وقد اكتشف أيضا مثل هرقل س-١ بواسطة القمر أوهورو. وقد بينت سرعة نبضه - وهى فى حدود جزء من ألف من الثانية - عن صغر حجمه. وبعد اكتشافه بقليل بدأ الفلكيون فى البحث عن مرافق مضىء بالقرب منه، وسرعان ما اتجه بحثهم إلى العملاق الأزرق HD226868. يقع هذا النجم على بعد ٨٠٠٠ سنة ضوئية من الأرض، ويبلغ ٢٣ مرة قدر كتلة الشمس. وصمم نموذج تسحب فيه غازات هذا العملاق فى قرص تراكمى حول ثقب أسود، وقد قبل هذا النموذج بقليل من التعديلات، ويعتبر النجم دجاجة س-١ هو من أقوى المرشحين كثقب أسود.

وما أن وضع النموذج حتى ثارت التساؤلات حول إمكانية وصف سلوك القرص التراكمى عن طريق جاذب، وكانت إحدى الفرق العاملة فى هذا الاتجاه تتكون من جيمس لوتشنر J ames Lochner وجين سوانك Jean Swankوأ. أ. زينكويك A. E. Szynk-waik من مركز الفضاء فى جودارد Goddard Space Flight Center. وباستخدام منحنى الإشعاع السينى من دجاجة س-١ أنشئوا فضاء الطور وبدءوا البحث عن جاذب ما، وتعتبر أبعاد الجاذب هامة لأنها تحدد عدد المعاملات الواجب التعامل معها كحد أدنى لوصف السلوك، وكذا إذا ما كان الجاذب عجيبا.

يقول لوتشنر: "إن وجه التحدى كان فى أن الأسلوب يتطلب بيانات نقية، بينما بيانات الإشارات السينية المستقبلة من القمر تصاحبها شوشرة عالية. لهذا السبب

بذلنا قدرا كبيرا من الجهد فى محاولة تصور مصادر الشوشرة وطبيعة تأثيرها على النتائج". وقد طبقا هذا الأسلوب على مجموعتين من البيانات، واحدة من القمر HEAO والثانية من القمر EXOSAT.

ولوتشنر من مواليد نيويورك وفيها شب عن الطوق، وشغف بالفلك من خلال قراءة الكتب والمقالات المتعلقة به، ويقول عن ذلك" من طريف الصدف أن موضوعا عن الثقوب السوداء طلب منى بالصف التاسع خلال مرحلة الدراسة الأساسية. وكنت أن اخترت النجم دجاجة س-١ بناء على مقال قرأته فى مجلة علمية، ولم أكن أعلم وقتها أنه نفس الموضوع سوف يكون رسالتى لنيل الدكتوراه". ونال لوتشنر درجته العلمية عام ١٩٨٩، ثم اتجه إلى لوس ألاموس لدراسات عليا، ثم التحق بجودارد حيث يعمل إلى اليوم.

ولم يجد الفريق أية دلائل على جاذب منخفض الأبعاد، ولكن بدت دلائل على احتمال لجاذب كثير الأبعاد، وحين سألت لوتشنر عن فرصة أبعاد كسرية (أى جاذب عجب) رد بأنه لا يملك الرد بسبب الشوشرة.

وفى الوقت الذى نشرت فيه أبحاث فريق لوتشنر وضعت أساليب أكثر تطورا، ولكنها لم تطبق على دجاجة س-١ بعد. كما يتحدث لوتشنر عن قمر جديد هو القمر XTE (X-ray Timing Explorer) الذى تم إطلاقه عام ١٩٩٥، ويتميز بهوائى ضخم وشوشرة منخفضة، ويتوقع منه نتائج هامة.

يقول لوتشنر: "الشيء المثير فى المشروع، وفيما يمكن لفكرة الهيولية أن تعد به، هو أنك تحصل على الإشارات المعقدة ظاهريا، وتكتشف أشياء حول النظام الفيزيائى الذى بثها. هذا هو وجه الإثارة الحقيقى بالنسبة لى فى الأمر. فحين تبدأ التفكير والتعلم عن الأقراص التراكمية تشعر أنها أشياء غاية فى التعقيد لدرجة أنه ما من أحد يفهمها حق فهمها. فالعمل الذى نقوم به هو أن نحدد: هل هى أشياء عشوائية كما افترضنا طويلا، أم أن هناك شيئا أبسط يكمن فى أعماق النظام؟ ذلك هو السؤال الذى لا يزال معلقا وإننى أرى أن أساليب التحليل التى تقدمها النظم الديناميكية اللاخطية والهيولية تمثل طريقا واعدا بقدر كبير فى الإجابة عليه."

وقد بذلت مجهودات لاكتشاف جاذبات فى أجرام أخرى أيضا، ففى أواخر الثمانينات قام جون كانيزو John Cannizzo ود. جودينج D. Gooding من كندا بالبحث

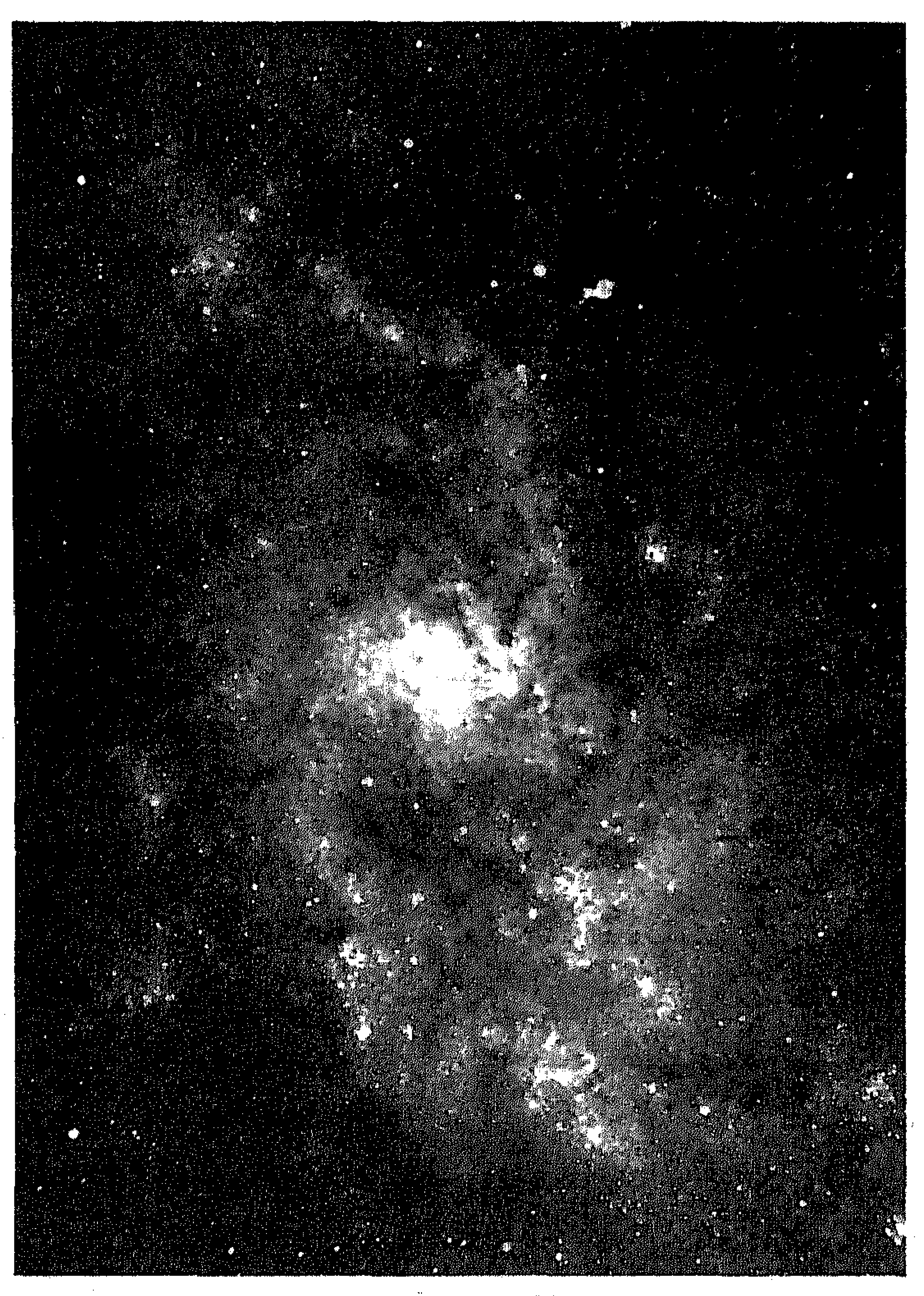
عن جاذب فى منحنى الضوء بالنسبة للنجم دجاجة س.س. SS Cygni، على أنهما لم يجدا شواهد على جاذب منخفض الأبعاد.

كما فعل م. جوبيل M. Goupil وم. أوفرني M. Auvergne وأ. باجلين A. Baglin من مرصد نيس بفرنسا نفس الشيء بالنسبة للقزم الأبيض النابض PG 1351+489 ووجدوا ملامح لتفرع ثنائى وحالة الهيولية.

ومن المناطق التى تعتبر خصبة لدراسات الهيولية فى الفضاء المستعرات العظمى Supernovae، ويجرى العمل على تطبيق ذلك على السحب التى تتخلف عن هذه انفجاراتها. وهناك العديد من العمليات والعوامل التى يعتقد أنها مسئولة عن تشكيل تلك السحب، منها الجاذبية الذاتية والاضطرابات والمجالات المغناطيسية، ومن شأن تطبيق أساليب التحليل الهيولى أن يعطى فهما أفضل لها.

الهيولية في المجرات

تعرضنا إلى الآن فى هذا الفصل إلى النظم التشتتية، أى النظم التى تتشتت فيها الطاقة. ولكن كما رأينا سابقا فالهيولية هامة أيضا للنظم غير التشتتية. وقد نظر هينون فى وجود مسارات هيولية فى كوكبات المجرات. وقد كان معروفا منذ وقت طويل أن المجرات، أو على الأقل أجزاء منها، غير مستقرة، وأن استقرارها يعتمد على كمية هائلة من المادة المعتمة. وبالضبط كما أن مدارات الكواكب والكويكبات فى النظام الشمسى يمكن أن تكون هيولية، كذلك يمكن أن تكون مدارات النجوم داخل مجراتها. وقد شوهدت مدارات من هذا القبيل فى بعض أنواع المجرات، ولذا فمن الأفضل إلقاء نظرة على كيفية تصنيف المجرات.



صورة لمجرة

إن نظرة سريعة على صور بعض المجرات تبين أن لها أشكالا متعددة، منها ما له أذرع طويلة لولبية متشعبة، ومنها ما هو أكثر انضماما. ومن المجرات ما هو إهليلجى الشكل، والقليل من المجرات ما يأخذ شكلا غير منتظم. وقد وضع إدوين هابل من مرصد ويلسون تصنيفا للمجرات يعود للثلاثينات، على النحو التالي: لولبية spiral،

لولبية قضيبية) barred spiral تماثل الأولى عدا أن لها ما يشبه القضبان المركزية فى هيكلها)، إهليلجية elliptical، غير منتظمة .irregular ثم صنف اللولبية واللولبية القضيبية طبقا لدرجة انضمامها، والإهليلجية طبقا لمدى استطالتها (منها ما يقترب من الدائرة ومنها ما يكون شديد الاستطالة). أما غير المنتظمة فقد وضعها فى صنف خاص بها.

وقد ساد اعتقاد لمدة طويلة بأن المجرات هى أعظم تجمع نجمى فى الفضاء، ولكن الفلكيين أخذوا يدركون تدريجيا أنها أيضا مثل النجوم، تميل للتجمع فيما هو أكبر منها تسمى بالحشود المجرية clusters. فمجرتنا، درب التبانة، قد ظهر أنها تنتمى إلى مجموعة من ٢٥ مجرة يطلق على مجموعها: الحشد المحلى Local Cluster. وفى الخمسينات اكتشف أن حشود المجرات تتجمع فى حشود أعظم Superclusters. فحشدنا المحلى ينتمى إلى حشد العذراء الأعظم Virgo Superciuste.

وتختلف المجرات فيما بينها فى أمور أخرى خلاف الشكل، فالبعض منها مجرات نشطة تطلق كميات هائلة من الإشعاع الكهرومغناطيسي، ربما نتيجة انفجارات هائلة فى داخلها. تسمى هذه المجرات بالمجرات النشطة active galaxies أو المجرات الراديوية .radio galaxies

وقد شغف ك. إينانن K. Innanen لعدة سنوات بموضوع الهيولية فى المجرات. تخرج إينانن من جامعة تورنتو بكندا، وقد اهتم باحتمال وجود نجوم فى حالة هيولية منذ منتصف الثمانينات، وفى ذلك يقول: "شغفت بالديناميكية اللاخطية للمجرات منذ دراستى للدكتوراه. فالغالب من مدارات النجوم داخل المجرات مستقر، على أن هناك احتمالا بالنسبة للنجوم التى تميل للوقوع فى مركز المجرة أن يكون لها مدارات هيولية. فلو أنه يوجد تركيز للمادة فى مركز المجرات، كما يعتقد الكثير من العلماء، فإن احتمال الهيولية لمدارات تلك النجوم يكون قويا".

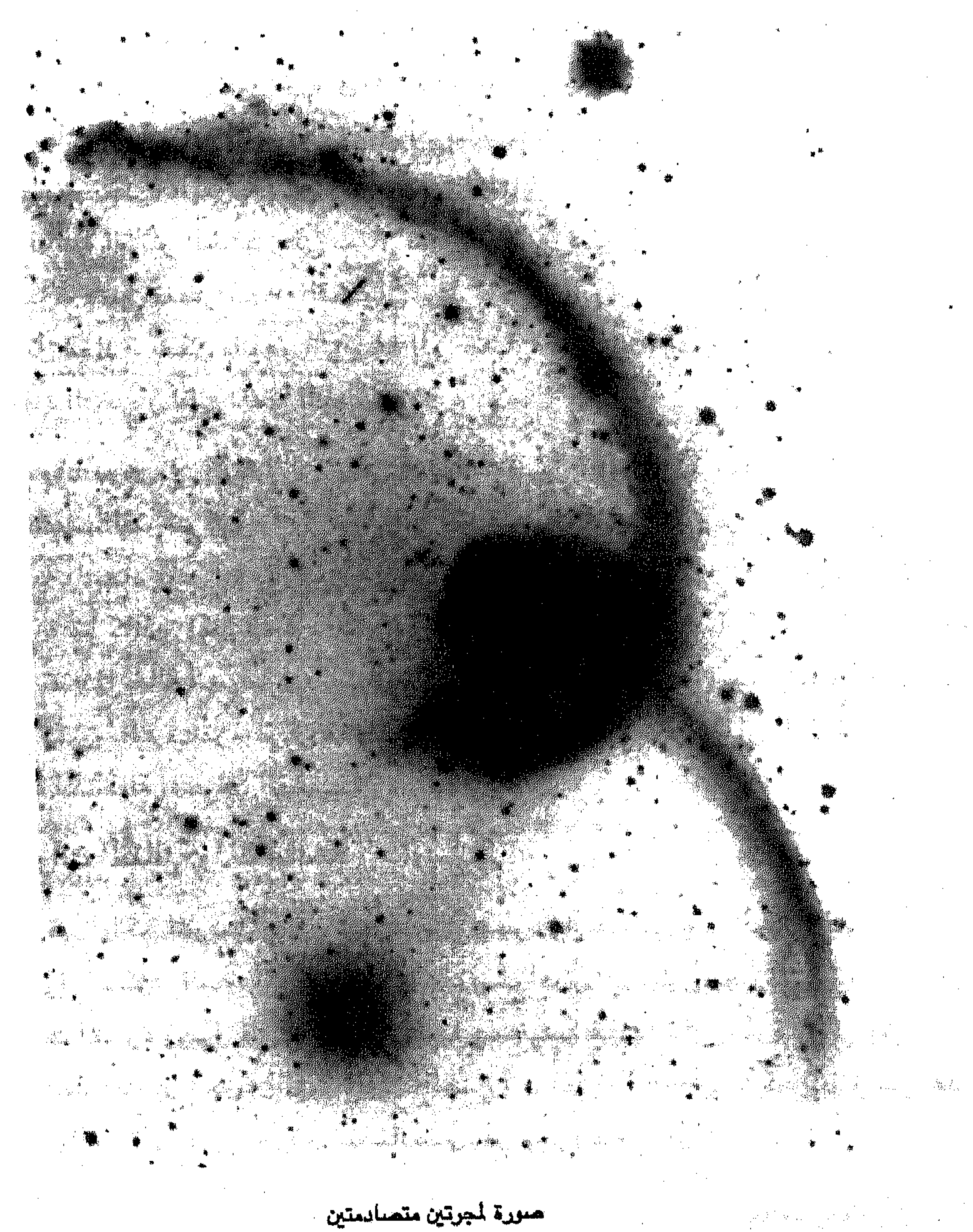
إن الذى يحدث حينما يمر نجم بالقرب من نواة المجرة، طبقا لرأى إينان، هو أن المجال التجاذبى للنواة يقذف بالنجم إلى المنطقة الخارجية من المجرة، إلى المنطقة المسماة بهالة المجرة halo. لقد كانت دراسته نظرية بحتة، ولم يوفق للآن فى الحصول على مشاهدات تؤيدها.

كما قام كل من هاشيما هاسان Hashima Hasan من معهد تلسكوب الفضاء Space-Telescopr Institute وكولين نورمان Colin Norman من جامعة جونز هوبكنز Hopkins Johns بدراسة الهيولية فى المجرات، وكان اهتمامهم منصبا على المجرات القضيبية. وفى نموذجهم تحدث الهيولية نتيجة ثقوب سوداء هائلة، أو تركيز هائل للمادة داخل المجرة. وقد درسا التأثير الحادث على مسار نجم عند مروره بجوار ثقب أسود حين تكون كتلته متغيرة، وحين تتغير أبعاد القضبان. وقد توصلا إلى أن الثقوب السوداء، أو التركيز الهائل للمادة، يمكن بالفعل أن يؤديا إلى مسارات هيولية، وهو ما يمكن أن يؤدى إلى اختفاء القضبان على المدى الطويل.

وقد درس ج. كونتوبولوس G. Contopoulos من جامعة أثينا ظاهرة التفرع الثنائى وتضاعف الفترات كمرحلة للتحول إلى الهيولية فى المجرات. وعن طريق نماذج ثنائية وثلاثية الأبعاد وجد أنه بالتغيير فى بعض العوامل تزداد مناطق الهيولية، كما اكتشف ثابتا عاما كالذى اكتشفه فايجنباوم، ولكنه مختلف عنه فى القيمة. كما وجد أن النجوم التى تنتابها حالة الهيولية فى المناطق الخارجية للمجرة يمكن أن تنطلق بعيدا عنها، أما التى تكون بالقرب من المركز فلا تستطيع ذلك. من جهة أخرى فإن الهيولية تحد من عملية استطالة المجرات القضيبية.

المجرات الثنائية والمتصادمة

فى أواخر الأربعينات تم التعرف على مجرة راديوية فى قلب كوكبة الدجاجة. ومن خلال التلسكوب البصرى بدا شكلها غريبا، أقرب ما يكون لمجرتين متصادمتين. وتملكت الإثارة رجال الفلك، فلو كان هذا صحيحا فإنها تكون المرة الأولى يشهدون فيها تصادما بين مجرتين. ومع الوقت اتضح أن دجاجة أ Cygnus A كما أطلق على هذا الشيء الفضائى ليس مجرتين متصادمتين، بل مجرة متفجرة.



صورة لمجرتين متصادمتين

على أن تصادم المجرات سرعان ما اكتشف بالفعل. وفى عام ١٩٦٦ نشر هالتون أرب Halton Arp من مرصدى ويلسون وجبل بالومار أطلسا عن المجرات الغريبة باسم Atlas of Peculiar Galaxies، تضمن عديدا من صور المجرات المتصادمة. وسرعان ما قام

الفلكيون بنمذجة هذه الظاهرة حاسوبيا، وأول من قام بذلك آلار وجورى تومر Alar and Juri Toomre الذان كانا وقتها فى جامعة نيويورك. وقد كانت النتائج التى استخلصوها حاسوبيا قريبة بصورة مدهشة لما التقط لهذه المجرات من صور. ومع تقدم تقنية الحواسب ازدادت هذه النماذج دقة.

ومع الاضطراب المصاحب لتصادم مجرتين فإن احتمال دخول نجوم منها فى حالة الهيولية يكون قويا. لهذا السبب تبدو ظاهرة المجرات المتصادمة من المجالات الخصبة لدراسة الهيولية. وقد شغف بهذا الاحتمال ب. ستيوارت P. Stewart من جامعة مانشستر عام ١٩٩٤، فوضع نموذجا حاسوبيا أتاح له أن يتتبع كل من المجرات الثنائية والمتصادمة. وعلى نموذجه أخذ يعدل من العوامل ليرى كيفية تحقق احتمال الهيولية، مفترضا مجرتين متساويتين فى الكتلة. من نتائجه عن فضاء الطور ومقاطع بوانكريه ورقم ليابونوف توصل إلى احتمالات قوية لحدوث الهيولية.

كما رأينا، تحدث الهيولية فى النجوم والمجرات على حد سواء، وقد وجد أن النجوم المتغيرة يمكن أن تنبض هيوليا، وإذا كان لنا أن نفهمها جيدا فعلينا أن ندرس كيف ولماذا تكتسب هذه الحالة. لقد تحقق الكثير، ولكن المجال لا يزال خصبا. من جهة أخرى فقد شوهد أن بعض مصادر الموجات الراديوية فى الفضاء تتصرف بطرق شاذة، وقد درست هذه المصادر من وجهة نظر الهيولية، وأخيرا فقد اتجهت الأنظار للمجرات، ولا يزال الطريق واعدا.

(١) تسمى هذه الأنواع من النجوم المتغيرة "النباضات، أو البلسارات" - المترجم

الفصل الثالث عشر

الهيولية فى النسبية العامة، والثقوب السوداء، وعلم الكونيات

رأينا فيما سبق أن الهيولية تنشأ فى الظواهر التى يمكن وصفها عن طريق معادلات ديناميكية غير خطية، حتى ما كان منها غاية فى البساطة، مثل حركة البندول. ونظرية النسبية العامة هى من أشهر النظريات قاطبة، وقد صيغت على شكل معادلة غير خطية، مما يجعلنا نتساءل عن إمكانية حدوث حالة الهيولية فى بعض الظواهر التى تصفها، خاصة الثقوب السوداء، والأجرام التى تدور حولها، بل والكون بأسره. وليس هذا بالسؤال السهل الإجابة عليه، فالمشكلة هى أن معادلة النسبية العامة ذاتها من التعقيد لدرجة أن أغلب حلولها العامة لم يمكن بعد الوصول إليها. لقد حلت بالطبع بالنسبة لكثير من النظم البسيطة، مثل حالة وجود تماثل قوى (كالأشكال الكروية مثلا)، حيث تؤول النظرية إلى عدد من النظريات العادية القابلة للحل بسهولة، ولكن الهيولية لا تظهر فى مثل هذه الحالات. ففى الحالات الواقعية التى تحدث حقيقة فى الطبيعة والتى يمكن للهيولية أن تظهر بها، تكون المعادلات إما غير قابلة للحل أصلا، أو معقدة بصورة لا تتخيل. إنه موقف محير، إذا لجأنا للتبسيط فإن الهيولية لا تظهر، وإذا وضعنا نموذجا واقعيا فإن المعادلات تستعصى على الحل.

نظرية النسبية العامة

وضع آينشتاين نظرية النسبية الخاصة عام ١٩٠٥، كانت نظرية جديدة مختلفة جد الاختلاف، هاجمت الفكر التقليدى بضراوة فيما يتخيله عن الزمن والفضاء. فمنذ عهد نيوتن ويعتبر هذان المفهومان مطلقين، بمعنى أنهما نفس الشيء لكافة المراقبين فى الكون. وقد حطمت النظرية النسبية هذه القواعد الركيزية للعلم، وحين فعلت أدخلت عددا من الأفكار الغاية فى الغرابة، لدرجة أن العلماء فى ذلك الوقت، وعلى الرغم من

وفرة الشواهد، رفضوا تصديقها ردحا طولا من الزمن. فطبقا لما ذهب إليه آينشتاين، فإن معدل سريان الزمن لمراقب ما يجرى بصورة مختلفة عنه لمراقب آخر يسير بسرعة مختلفة. بعبارة أخرى فإن السرعة النسبية بين الأنظمة تؤثر على سريان الزمن لكل منها. كما أن الأجسام تتكمش فى اتجاه حركتها، فعصا طولها ياردة تسير مقتربة من سرعة الضوء لن يزيد طولها عن عدة بوصات بالنسبة لمراقب آخر أقل سرعة.

كانت النظرية النسبية لُقمة صعب ازدرادها على الكثيرين، ولكن تم الاعتراف بها فى غضون عدة سنوات، باعتبارها نقطة تحول فى تاريخ العلم. ولم يكن آينشتاين عابئا بالتكريم الذى أحيط به لهذا النجاح، فقد كان ذهنه مشغولا بقضايا أخرى. لقد كان يدرك أن نظريته غير مكتملة، فهى مقصورة على حركة الأجسام بسرعة ثابتة فى خط مستقيم، أو بعبارة أخرى على الحركة غير التسارعية، وهى الأهم من وجهة نظر الطبيعة. وعلى هذا الأساس نشط آينشتاين لوضع النظرية النسبية العامة.

انبثق من ذهن آينشاين ما يسمى بمبدأ التعادلية، بديهية افترضها حول التعادل بين التسارع والجاذبية. فلو أنك ركبت مصعدا يتسارع إلى أعلى فى الفراغ بمعدل ٣٢ قدما فى الثانية المربعة (تسارع السقوط الحر) فإنك ستكون فى نفس ظروفك لو كان المصعد واقفا بك على سطح الأرض، بل لو كان المصعد مغلقا فلن تتمكن من معرفة فى أى الحالتين أنت.

واعتصر آينشتاين ذهنه لعشر سنوات، إلى أن جمع كافة أفكاره عام ١٩١٥ فى عدد من المعادلات نعرفها اليوم باسم معادلات المجال للنظرية النسبية العامة. ومن المثير أنها خرجت تماما عن أن تكون مجرد تعميم للنظرية النسبية الخاصة. إنها بعد أن أسست على مبدأ التعادلية قد أضحت نظرية عن الجاذبية.

وقد سبق لنيوتن منذ ثلاثة قرون أن صاغ نظرية عن الجاذبية، آتت أكلها طوال هذه الفترة، فما الجديد فى نظرية آينشتاين عنها؟ لقد جاءت نظرية آينشتاين بما جاء به نيوتن، كما أتت بالمزيد، فهى فى الواقع مؤسسة على نظرة مختلفة تماما عن الجاذبية. لقد افترضها نيوتن قوة خفية تعمل من بعيد على مستوى الكون، لا يمكن تفسيرها. ولكن آينشتاين قد نظر للجاذبية على أنها تقوس فى الفضاء، تقوس لا يمكننا ملاحظته ولكننا نعايش آثاره. فالكواكب تتحرك فى الفضاء المقوس على طول أقصر المسارات، وهو ما نطلق عليه رياضيا "الجيوديسي" geodesics، وهى ليست بالضرورة الخط المستقيم كما عهدنا. فحتى خبرتنا المحدودة تنبئنا عن ذلك، فنحن حين نتحرك على سطح الأرض لا نسير فى خطوط مستقيمة، بل فى منحنيات دائرية. وفى

الفراغ ثلاثى الأبعاد، أو بالأحرى فى الزمكان الرباعى الأبعاد، تتحرك الكواكب بالفعل فى جوديسى عبارة عن مدرات منحنية حول الشمس.

كشرط أولى كان على نظرية آينشتاين أن تعطى نظرية نيوتن، وقد فعلت، ولكن بإضافة معامل معين، فما قيمته يا ترى؟ إنه يقدم تنبؤا بحركة بطيئة للمحور الأكبر للإهليلجى لدوران الأجرام، يسمى "مبادرة" precession. لقد لاحظ الفلكيون اختلافا بين حركة عطارد وما تقول به الحسابات طبقا لنظرية نيوتن، وهو ما تطابق تماما مع حسابات نظرية آينشتاين.

كما أن النظرية تنبأت بانحناء الضوء نتيجة للجاذبية، فصورة النجم يمكن أن تبدو مزاحة تجاه الشمس خلافا لموقعها الحقيقي، وقد تأكدت هذه الظاهرة عام ١٩١٩ خلال كسوف كلي. وأخيرا فإن النظرية تتنبأ بأن للمجال الجذبى تأثير على سريان الزمن، فتبطئ الساعات فى المجال القوى بالنسبة لغيرها فى المجال الأضعف، ومرة أخرى لقد حققت المشاهدات هذا التنبؤ.

على أن اهتمامنا منصب على عدم الخطية فى معادلات المجال، وحالة الهيولية التى يمكن أن تتمخض عن ذلك.

عدم خطية معادلات آينشتاين

تكلمنا باختصار عن عدم الخطية فى فصول سابقة، ولكن من المفيد أن نلقى نظرة ثانية عليها فيما يتعلق بمعادلات آينشتاين. إن المعادلات اللاخطية لها من الخصائص ومن المصاعب مالا يكون للمعادلات الخطية. فعلى سبيل المثال، لو أن المعادلات اللاخطية تصف مجموعة من العناصر، وأردنا أن نجد التأثير النهائى لها جميعا، فإنه ليس بمقدورنا أن نقوم بعملية الجمع البسيطة لأثر كل واحد على حدة. ينتج ذلك لأنه فى الأنظمة اللاخطية توجد تأثيرات متبادلة بين العناصر، ويكون بذلك أثر كل عنصر متأثرا ببقية عناصر المجموعة. ومن الوجهة الرياضية فإن التغير فى معامل ما لا يقابله تغير فى الجانب الآخر من المعادلة بنفس النسبة.

ومن المثير أن نعلم أنه فى أغلب الظواهر التى تتعامل معها النظرية النسبية لا تكون هذه اللاخطية مهمة، إذ يمكن تقريب المعادلات بشأنها وتكون النتائج مرضية. ففى الظواهر الثلاثة المذكورة آنفا لم تكن اللاخطية هامة إلا بالنسبة لحركة عطارد.

ولكن اللاخطية تلعب دورا هاما فى الكون، ولذا فمن الأهمية بمكان أن نتناولها بالدراسة. وحتى نرى آثارها واضحة علينا أن نتجه للمناطق التى يكون فيها المجال الجذبى لا خطيا بشكل ملحوظ. فمثلا، حين ينهار نجم ما، فإن مجاله الجذبى يزداد، إلى أن يصبح لا خطيا بدرجة كبيرة فى الحالة النهائية، كحالة الثقوب السوداء أو ثقوب الديدان wormholes.

كما أن اللاخطية هامة فى دراسة الكون فى مراحله الأولى. فطبقا لنظرية الانفجار العظيم big bang، تولد كوننا من مفردة singularity، وهى نقطة ذات كثافة لانهائية، منذ خمسة عشر بليونا من الأعوام تقريبا . ومن المحتمل أن يعود الكون إلى هذه المفردة مرة أخرى فيما يسمى "الانسحاق العظيم" big crunch.

واللاخطية هامة لأنها تؤدى إلى الهيولية، وليس معنى ذلك أنها تنشأ بالضرورة فى كافة أحوال اللاخطية، بل يحدث ذلك فقط حين تتحقق شروط معينة. فبالنسبة لمعادلات آينشتاين مثلا، لا تظهر الهيولية فى حالات التماثل الشديد.

وللاخطية فى معادلات آينشتاين أهمية فى مسألة أخرى أيضا ، إن من آمال البشرية وضع نظرية جامعة تفسر كل شيء. ولقد قضى آينشتاين الثلاثين عاما الأخيرة من عمره باحثا عن نظرية كهذه، تجمع بين الجاذبية والقوة الكهرومغناطسية، دون جدوى، ولم يستطع أحد للآن القيام بذلك. بل إن المشكلة ازدادت تعقدا اليوم بظهور قوتين جديدتين من قوى الطبيعة يجب أن تضمهما النظرية الجامعة.

إن سبب استعصاء الجاذبية على التوحد مع القوة الكهرومغناطيسية فى نظرة جامعة له علاقة بموضوع اللاخطية. فلكى يتوحد المجالان بطريقة سلسة يجب أن تتوافق النظرية النسبية فى هيكلها مع النظرية الكمية، وهى مشكلة أعجزت أجيالا من الفيزيائيين. إن تنفيذ ذلك بالنسبة للقوة الكهرومغناطيسية كان أمرا سهلا، وذلك لكون معادلاتها خطية، ومن ثم فقد انصرف العلماء عن محاولة تشكيل الجاذبية على أساس كمي، واتجهوا إلى طريق آخر.

من أهم المشاكل المتعلقة بالنظرية النسبية العامة هى أنها ليست نظرية بالمعنى المفهوم، ففى الغالب من النظريات يكون لدى المرء أساسا راسخا، أو إطارا مرجعيا، يدور فى خلاله البحث عن الحلول. أما فى حالة النسبية العامة فإن الحل، ألا وهو الزمكان، هو ذاته الإطار المرجعي، وليس من المحتم أن يكون مستقرا. فكما رأينا سابقا لا الزمن ولا الفضاء مطلقين كما هما فى نظرية نيوتن. فالفضاء يمكن أن يلتوى والزمن يمكن أن يمط مع ذلك الالتواء. يقول سفند روغ Svend Rugh من معهد نيلز بور بكوبنهاجن: "إن نظرية آينشتاين... لا تقدم لنا مجموعة من المعاملات المتعلقة بالزمن كما تفعل النظريات الكلاسيكية."

يشتغل روغ بالمسألة منذ سنوات، ويود لو يضع تعريفا أفضل للهيولية فى مضمار النظرية النسبية العامة، يتحاشى المشكلة المذكورة. كما أنه مهتم بتقارب المسارات

كمعيار للهيولية. إن نظرية آينشتاين هى كغيرها من النظريات من حيث أنه حين تحدد قيم المعاملات فإن تطور النظام يكون قد عرف تماما. بمعنى آخر، إنها تخبرنا حين تتغير المعاملات هل تتقارب المسارات أم تتباعد، وإذا تباعدت فهل يكون ذلك بالسرعة الكافية لتوليد الهيولية. ولكن يوجد شيء من الغموض كما يذهب روغ: "ما الذى نقصده حقا بكلمة "مسار قريب" فى مجال النسبية العامة؟ إنها كلمة غير دقيقة التحديد."

لنلق نظرة على حل معادلة آينشتاين. من العجب أنه لم يكن أول من قام بذلك، لقد تم ذلك على يد كارل شفارتزشلد Karl Schwartzchild، جندى ألمانى كان مرابطا فى روسيا فى الحرب العالمية الأولى. كان شفارتزشلد طريح الفراش حين رأى المعادلة، فانكب على حلها وأنجز ذلك فى عدة أيام وبعث الحل لآينشتاين.

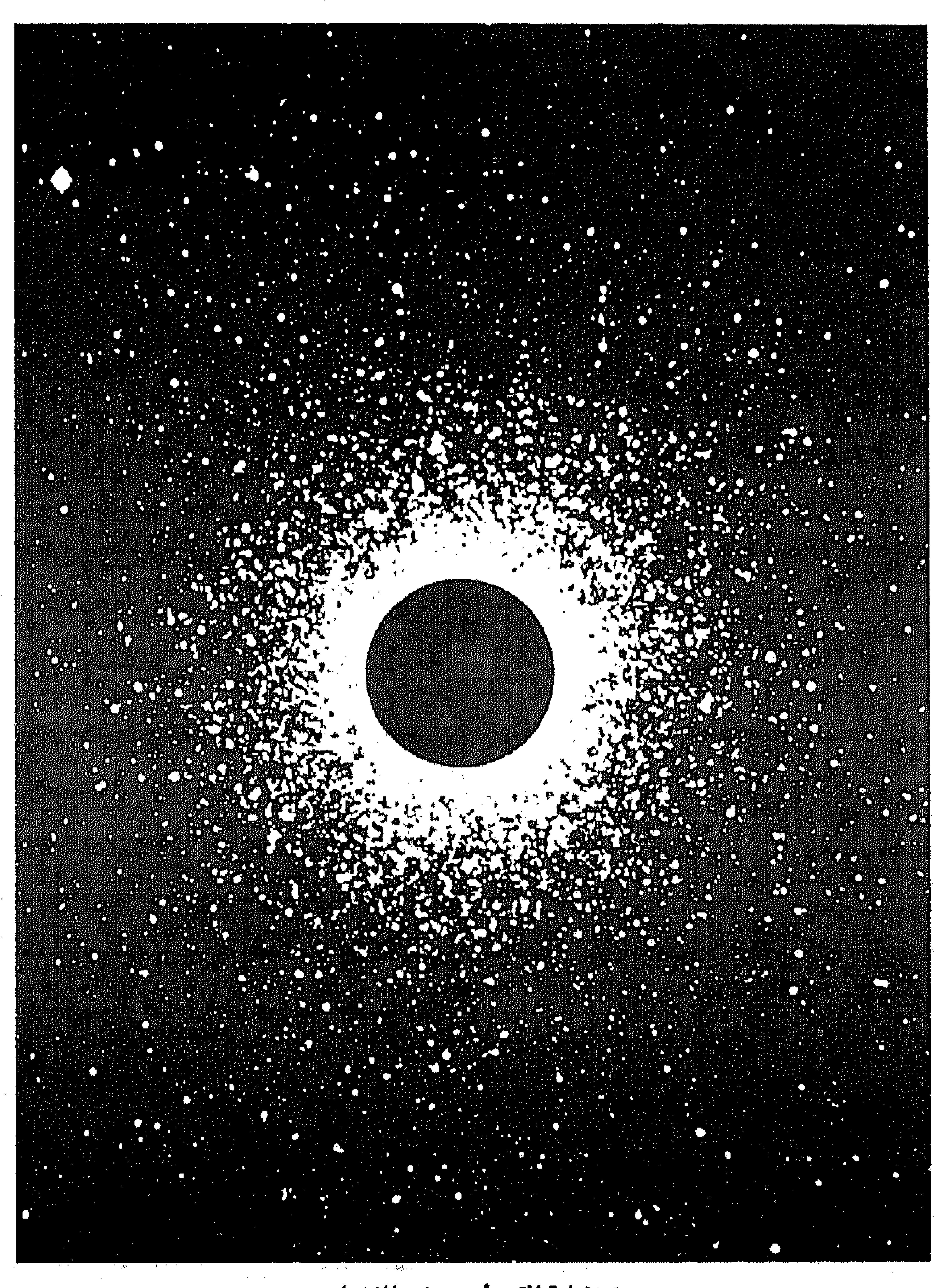
دهش آينشتاين أيما اندهاش وسر أيما سرور لرؤية معادلته وقد حلت بهذه السرعة. وأرسل إلى شفارتزشلد يخبره بأنه سوف يعرض الحل على أول لقاء تال للأكاديمية البروسية، على أن القدر لم يمهل شفارتزشلد ليرى ثمرة إنجازه.

يعتبر حل شفارتزشلد أبسط صورة لحلول المعادلة، فقد طبق المعادلة على حالة الكرة. ولكن بما أن أغلب الأشياء فى الكون كروية فإن الحل بالغ الأهمية. إننا نعلم الآن أنه مالم يوجد تأثير خارجي، فإن الأجسام الكروية لا يمكن أن تحدث حالة الهيولية، وعلى ذلك فحل شفارتزشلد ليست له أهمية فى دراستنا للهيولية. ومنذ أن قام شفارتزشلد بإنجازه وضعت حلول كثيرة لمعادلة آينشتاين (لنظم غير كروية)، يمكن منها ما يكون ذا قيمة من وجهة نظر الهيولية.

الثقوب السوداء

من أهم ما تنبأت به النظرية النسبية الثقوب السوداء. بالنسبة لآينشتاين وغيره ممن رأوا بذور هذه الفكرة فى المعادلة كان ذلك مصدر ضيق لهم، فقد بدت كعيب فى المعادلة، وليس ككشف مثير يحسب لها.

إن العجيب فى الأمر أن فكرة الثقوب السوداء لم تكن جديدة، بل كانت فى الأفق لقرن مضى، ففى عام ١٨٧٤ تنبأ جون ميشيل John Michell من إنجلترا بأنه لو بلغت كتلة نجم قدرا كافيا فإنه سوف يكون قادرا على حبس الضوء بداخله، ويصبح بذلك مخفيا عن الأعين. كما توصل العالم الفرنسي الشهير لابلاس إلى نفس النتيجة بعد عدة أعوام، وقد نشر فكرته فى كتاب له، ثم عدل عنها بعد ذلك .



صورة تخيلية لثقب أسود في الفضاء

لكي نفهم ماهية الثقوب السوداء علينا أن نفهم فكرة سرعة الهروب. إنها السرعة التى يحتاجها جسم للهروب من قبضة جاذبية جسم آخر. فلكى يهرب جسم من جاذبية الأرض يجب أن يكتسب سرعة تساوى ٢٥ ألف ميل فى الساعة. يعنى ذلك أنه لو أطلق صاروخ بهذه السرعة فلن يعود للأرض مرة ثانية، بل سينطلق إلى الفضاء الرحب.

وتعتمد سرعة الهروب على الكتلة، ولذا فإن الأجرام ذات الكتلة الأكبر تكون سرعة الهروب منها أعلى. ولكن طبقا لنظرية الجاذبية هناك حد لا يمكن أن تتجاوزه الأجسام، هو سرعة الضوء. ما الذى يحدث لو أن سرعة الهروب زادت عن ذلك؟ وهل هذا ممكن التحقق؟ إننا بإمكاننا فى الواقع أن نتصور، كما فعل ميشيل ولابلاس، أن الأرض أخذت فى التمدد مع ثبوت كثافتها إلى أن بلغت سرعة الهروب منها سرعة الضوء، وقد بينا أن ذلك يعنى أن تكون ذات قطر يساوى قطر المريخ. بعد هذا القطر مباشرة لن تكون الأرض مرئية، فالضوء الذى بها لن يستطيع الهروب إلى خارجها.

هل يوجد فى الطبيعة شيء من هذا القبيل؟ إننا لا نعرف كوكبا بهذه الصورة، ولكن الظاهرة يمكن أن تتحقق عندما ينهار نجم على نفسه. فالنجم طوال حياته فى حالة توازن بين قوتين، قوة تسحقه للداخل هى جاذبية مكوناته، وقود طاردة للخارج ناتجة عن ضغط الغازات بداخله. وحين يوشك الوقود النووى الداخلى فى النجم على النفاد، يأخذ النجم فى الانهيار. وقد بين روبرت أوبنهايمر Robert Oppenheimer أن هذا الانهيار يأخذ شكل كارثة، فكل المادة فى النجم يمكن أن تنهار إلى نقطة تسمى "مفردة" singularity. العجيب فى الأمر أن هذه المفردة تكون محاطة بسطح كروى أسود، نسميه اليوم أفق الأحداث .event horizon وهو يسمى بذلك لأنه يمثل نهاية الأحداث المتعلقة بالكون، فما أن تعبره حتى يكتب عليك عدم الرجوع للكون مرة أخرى.

وللثقوب السوداء، كما تعرف هذه الأجرام، خواص عجيبة للغاية. فلو أنك اقتربت من واحد منها، فإن قوى الجاذبية سوف تعتصرك عصرا. ولو أنك قارنت الزمن لديك بما لدى مراقب على البعد، فإنك سوف تجد فرقا. سوف تجد أن ساعة البعيد عنك تجرى بسرعة للغاية، بينما يجد هو ساعتك تسير ببطء شديد، وكل منكما لن يلاحظ شيئا غريبا فى ساعته هو.

ومن العجيب أن للثقوب السوداء ثلاثة خواص فقط، الكتلة والشحنة واللف المغزلي. يعطينا هذا أربعة أنواع فقط من الثقوب السوداء: ثقب شفارتزشلد له كتلة فقط، وثقب رايسنر-نوردشتروم Reissner-Nordstrám له شحنة، ثقب كر Kerr له لف مغزلي، ثم ثقب كر-نيومان Kerr-Newman له الخصائص الثلاثة، الكتلة والشحنة واللف.

هذا من وجهة نظر النسبية، فماذا عن المشاهدات الواقعية؟ هل تعرفنا على مرشح جيد يلعب دور ثقب أسود؟ لقد كان هذا بالفعل، ولكن العدد أصغر من أن

يرضى شهية الفلكيين. لا أحد يعرف السبب، ولكن الأمر يتطلب جرما ذا كتلة تعادل ٢٠ مرة كتلة الشمس لكي ينتج ثقب أسود (بعد تكون الثقب يكفى كتلة تعادل ٣,٢ مرة كتلة الشمس لبقائه). ربما كان هذا هو السبب الرئيسي. من أقدم المرشحين لهذا الدور النجم دجاجة س-١ فى كوكبة الدجاجة. إنه مصدر للأشعة السينية ينبض بسرعة شديدة، وهو ما يدل على أن النجم صغير للغاية، ليس أكثر من عدة أميال فى القطر، ولذا فأصغر من أن يرى بالتلسكوب.

ويحدث الإشعاع السينى حين تجذب مادة من نجم (الجرم الابتدائي) إلى جرم صغير منهار على نفسه (الجرم الثانوي). ويمكن أن يكون الجرم الثانوى ثقبا أسود، وفى حالتنا تم التعرف بصريا على الجرم الابتدائي، وكان عملاقا أزرق، وحين عرفت كتلته حسبت كتلة رفيقه، فكانت قدر الشمس ثمانية مرات، كتلة كافية ليكون ثقبا أسود.

الثقوب السوداء والهيولية

الثقوب السوداء من عجائب الكون، وهى ذات أهمية لنا من حيث أن وصفها يكون بمعادلات غير خطية منبثقة من النظرية النسبية العامة. ويمكن للهيولية أن تنتاب الثقوب السوداء من جهتين. فأولا، الهيولية التى توصف عادة باسم "الهيولية الجيوديسية" geodesic chaos، وهى ما رأيناه سابقا فى الكواكب والكويكبات. فلو أن جرما صغيرا، ككوكب مثلا، كان يدور حول ثقب أسود، فإن مداره يمكن أن يصبح هيوليا لو تحققت حالة رنين مناسبة. على أننا بوجه عام لا نحصل على هيولية من هذه الحالة. فحتى لو كان الثقب معقدا، مثل ثقب كر-نيومان، فإن الهيولية تعتبر بعيدة الاحتمال، إن اضطرابا خارجيا يلزم لحدوث ذلك، قد يكون من جرم آخر، أو بغمر الثقب الأسود فى مجال مغناطيسى أو كهرومغناطيسي.

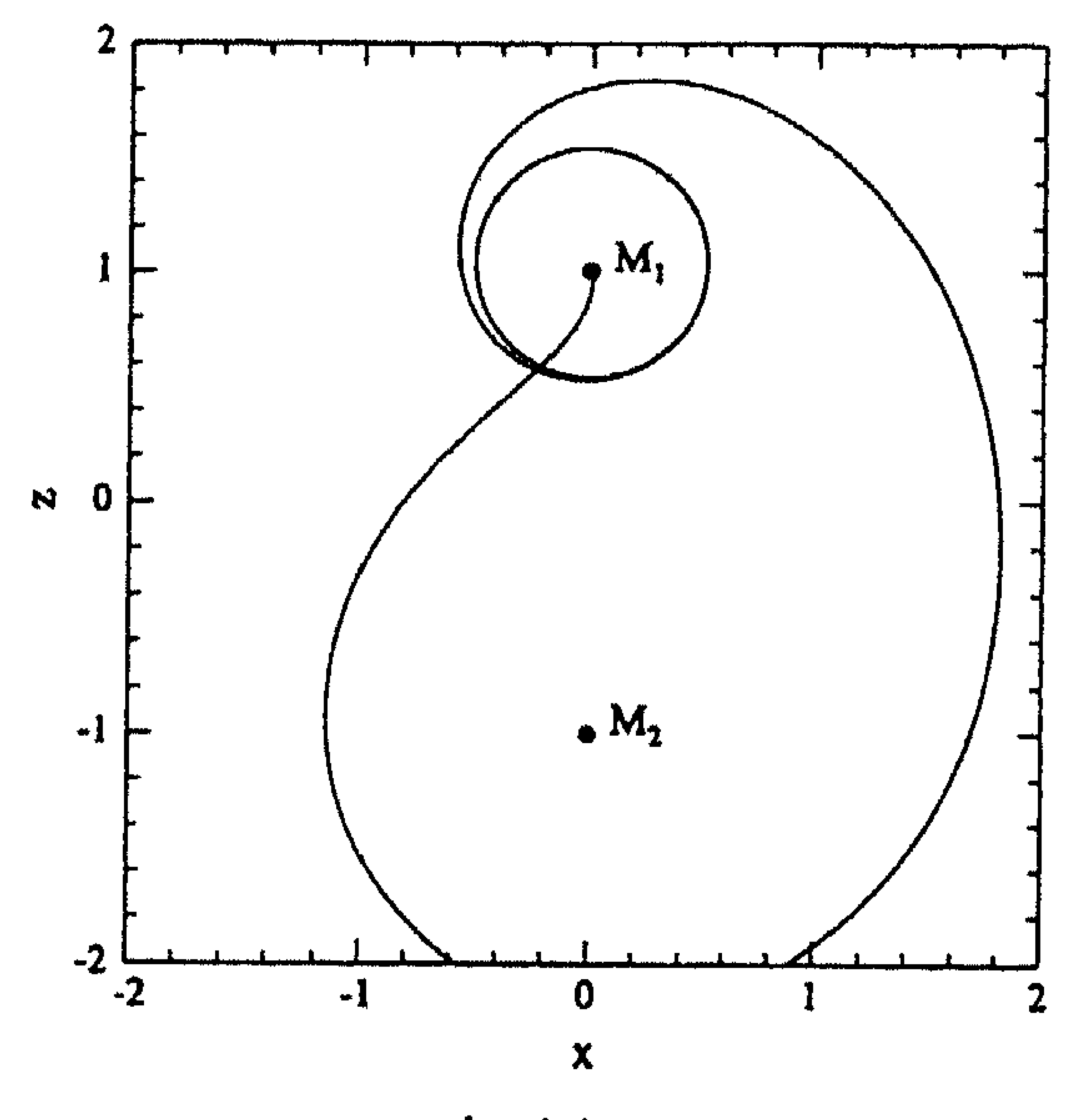
إن الهيولية التى وصفناها فيما سبق تحدث فقط فى النظم غير التشتتية، ولكن النظم التشتتية التى تتضمن ثقوبا سوداء محتملة أيضا، وبإمكانها أن تحدث حالة الهيولية. هذه هى هيولية النوع الثاني. تصور ثقبين أسودين، أو ثقبا أسود مع نجم نيوتروني، يدوران حول بعضهما البعض. إن قدرا كبيرا من الإشعاع الكهرومغناطيسى والتجاذبى سوف ينتشر من نظام كهذا، وهو ما يحدث تسرب الطاقة. إن حدوث جاذب عجيب فى هذا النظام يعنى حدوث الهيولية.

درس كل من لوكا بومبيلي Luca Bombelli الذى يعمل حاليا فى ميرسيهورست كولدج Mercyhurst Collage فى إيري Erie بينسلفانيا وإستبان كالزتا Esteban Calzetta

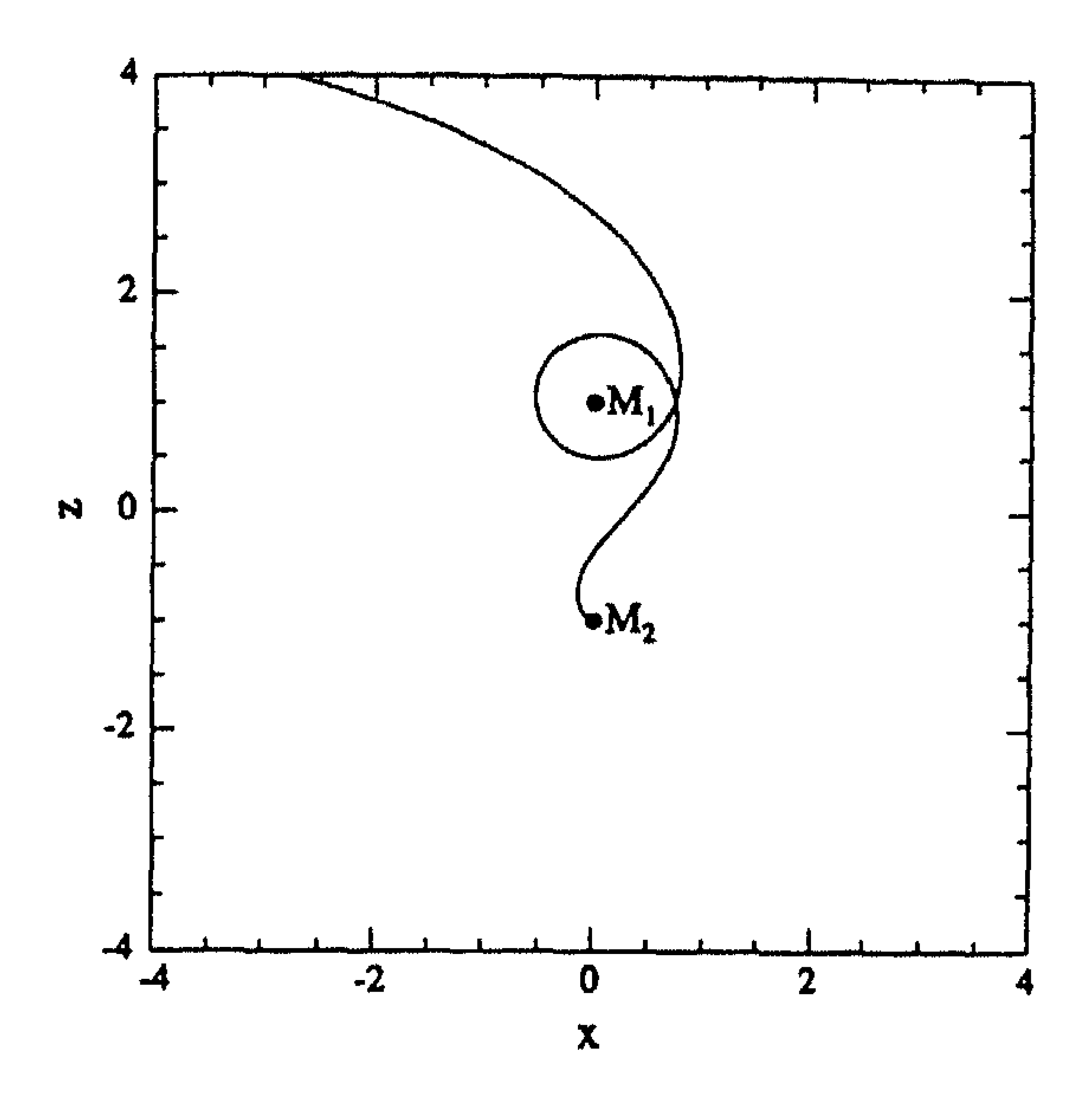
من معهد الفلك فى بوينس أيرس بالأرجنتين نظاما متكونا من جرم (يمثل كوكبا مثلا) يدور حول ثقب أسود كروى عادي، أى ثقب شفارتزشلد يواجه اضطرابا من نوع ما، يمكن أن يحدث من جرم صغير مثلا.

ولد بومبلينى فى سويسرا من أب إيطالى وأم سويدية، وترعرع فى أسبانيا ثم التحق بالكلية فى إيطاليا. وقد بدأ شغفه بالفلك والرياضيات مبكرا، يقول عن ذلك: "كنت دائما أحب الرياضيات، حتى حين أحصل على درجات منخفضة فيها."

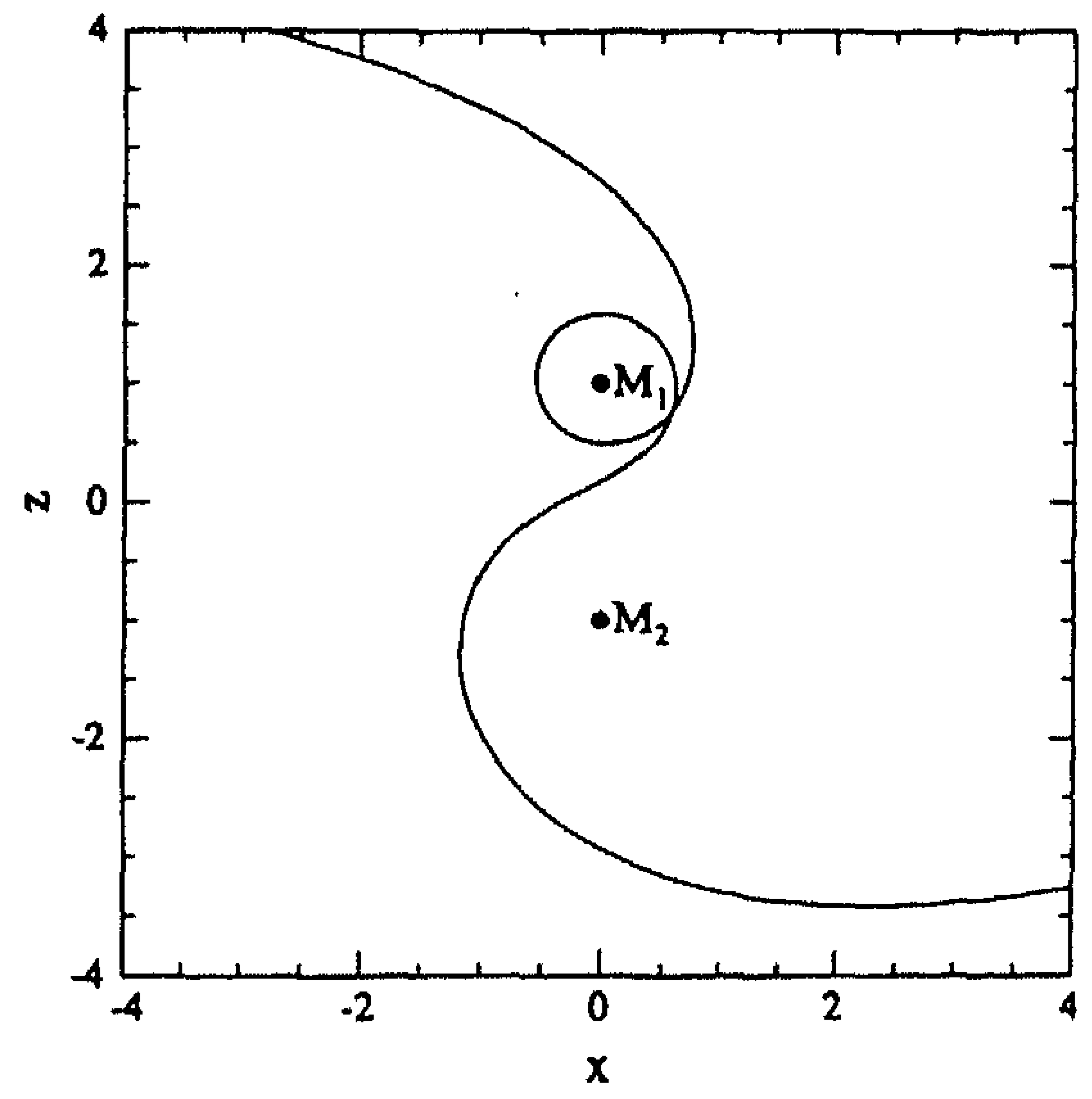
وجاء إلى كلية سيراكوس بالولايات المتحدة ليقوم بدراسات عملية فى الفيزياء، ولكنه أخذ يحضر مقابلات علمية عن النسبية، وفى هذه المقابلات قابل بيتر برجمان، زميل سابق لآينشتاين، ويقول عن ذلك: "كانت مجموعة النسبية رائعة لدرجة أننى قررت التحول لدراستها، إن العمل معهم كان مثيرا للإلهام."



فوتون يدور حول ثقبين أسودين



فوتون يدور حول ثقبين أسودين، حيث يدور حول الأول ثم يقتنصه الثانى



فوتون يدور حول ثقبين أسودين، حيث يدور حول أحدهما ويفر في الفضاء

بعد حصوله على الدكتوراه اتجه إلى بعض الجامعات للقيام بالأبحاث، من ذلك جامعة فى فرنش ببروكسل. كانت هناك عدة مجموعات تدرس الهيولية، وعلى الرغم من كونه من مجموعة النسبية فقد بدأ يحضر اللقاءات. وفى ذلك الوقت حضر إستبان كالزتا من الأرجنتين كأستاذ زائر، وتقابلا ثم سرعان ما جمع العمل بينهما.

يقول بومبيلي: "لم أكن أعرف تماما ما تعنيه واقعيا، بدأنا البحث عن نظام ينتمى إلى الفيزياء الفلكية، وقررنا البحث عن ثقب أسود. ووضعا برنامجا لتمثيل ثقب شفارتزشلد يدور حوله جسم اختباري."

من الصعوبات فى أى نظام من هذا القبيل هو التعرف على الهيولية حين تحدث، وكما رأينا سابقا، فالهيولية مصحوبة بتباعد المسارات فى فضاء الطور، وإذا ما كان التباعد سريعا بالقدر الكافي. يعبر عن ذلك عادة برقم ليابونوف الذى تحدثنا عنه سابقا. ولكن توجد صعوبات جمة فى هذا الأسلوب ومن ثم فقد قرر بومبيلى وكالزتا اللجوء لطريقة أخرى تسمى طريقة ملنيكوف Melnikov، وتقوم على البحث عن حدوة سمول داخل البيانات. وكما رأينا سابقا فإن سمول قد بين أن الهيولية مرتبطة بطى ومط فضاء الطور، وهى عملية تنتج شكلا أشبه بحدوة الفرس، وطريقة ملنيكوف تقدم الوسيلة للبحث عن هذا الشكل، وباستخدامها تعرف العالمان على الهيولية فى المدارات. والعالمان اليوم متباعدان بآلاف الأميال، ولكنهما لا يزالان يعملان معا، وقد تحولا إلى مسائل أخرى. يقول بومبلي: "إن النظام الذى نحن مهتمان به الآن هو النظم الجيوديسية، فنحن مهتمان بمسألة نظام ذى جسمين، إما ثقب أسود يدور حول ثقب آخر، أو يدور حول نجم نيوتروني. مثل هذا النظام يبعث بموجات جاذبية، وهو بذلك تشتتي."

وقد وجد الفلكيون نظاما كهذا يطلقون عليه النابضات الثنائية، ويعتقدون أنه يتكون من ثقب أسود ونجم نيوتروني. وقد عرف الكثير عنه، ولكن لم يبحث أحد بعد فى احتمال وجود هيولية فى حركته. وبما أن النظام تشتتي، فإن بومبلينى وكالزتا سوف يبحثان عن جاذب عجيب به. إنها مسألة أعقد مما تعاملا معها من قبل، فكل عملهم فى السابق كان تحليليا، ولكنهم سوف يستخدمون الطريقتين التحليلية والرقمية (الحاسوب) فى هذا النظام.

لكى تحدث الهيولية فى ثقب أسود منفرد لا بد من اضطراب خارجي، ولكن حين يدور جسم حول ثقبين أسودين يختلف الأمر تماما. إن المسألة الجيوديسية لثقبين

أسودين قد تم حلها بواسطة سوبرامانيان شاندراساخار١ Subrahmanyan Chandrsekhar من جامعة شيكاغو عام ١٩٨٩، وهو معروف بأعماله عن الثقوب السوداء، فكتابه "Mathematical Theory of Black Holes" يعتبر مرجعا شاملا لها.

وقد وجد شاندراساخار أن بعض المدارات فى مسألة الثقبين الأسودين محيرة، ولذا فقد اتصل بجورج كونتوبولوس من جامعة أثينا، وهو خبير معروف فى الهيولية ظهرت له عدة أبحاث فى هذا المجال وسأله أن يراجع الأمر. ورغم أن كونتوبولوس كان مستقرا بأثينا إلا أنه قضى بعض الوقت مؤخرا فى جامعة فلوريدا. وبعد أن تفحص المسألة وجد عدة أنواع من المدارات محتملة حول الثقوب السوداء. وقد بحث حالة جسيم خفيف (فوتون) وجسيم مادي، البعض منها كان محدودا فى مساره والبعض الآخر انطلق مبتعدا. بالطبع فإن المسارات الأولى هى المثيرة للاهتمام. ومن بينها وجد العديد من المدارات، فالجسيمات يمكن أن تدور حول الثقبين معا، أو أن تلف على شكل رقم ٨، أو تسقط فى أحدهما.

بين كونتوبولوس أن مدرات الفوتونات كانت هيولية تماما، وأغلب مدارات الجسيمات المادية القريبة من الثقوب هيولية أيضا، والبعض منها ليست كذلك. وعلى وجه الخصوص أوضح أنه بين كل مدارين مختلفى النوع يوجد مدار ثالث، وهذه هى فئة كانتور، تخبرنا عن حالة هيولية.

أما عن حركة الجسيمات حول ثقب مغمور فى مجال مغناطيسى فقد بحثها ف. كاراس ود. فوكرولكى من تشيكوسلوفاكيا. برسمهما فضاء الطور نظرا إلى مقطع بوانكريه وقاما بحساب رقم ليابونوف ثم أعلنا أنهما عثرا على الهيولية.

إن شواهد الهيولية فى النظم المحتوية على ثقوب سوداء تعتبر الآن وفيرة للغاية، كما أن اكتشافات هامة منتظر لها أن تتم فى المستقبل القريب.

الهيولية ونشأة الكون

من أهم مجالات النظرية النسبية العامة هو تطبيقها على الكون بأسره. وقد بدأ آينشتاين التفكير فى ذلك بعد إنهاء نظريته بوقت قليل. ولكنه سرعان ما اكتشف أن الكون حين يوصف بواسطة معادلاته يصبح غير مستقر، بل يميل إلى التمدد أو الانكماش. ولما كانت هذه الفكرة شاذة للغاية طبقا للمفاهيم العلمية الشائعة، فإنه ظن أن فى الأمر خطأ ما. ولكى يحافظ على كونه مستقرا، فإنه أدخل على معادلته ثابتا

سمى "الثابت الكونى" cosmic constant، كان تأثيره على المدى الشاسع من الكون، دون تأثير له يذكر على النطاق الضيق، وبذلك تمكن من الحفاظ على كونه ضد التغير.

وفى نفس عام نشر آينشتاين بحثه عن علم الكونيات، نشر فلكى هولندى هو ويليام دى سيتر William De Sitter بحثا آخر. لقد رأى أن حلا للنظرية فات آينشتاين فى نموذجه للكون، وعلى الفور أصبح نموذج دى سيتر منافسا خطيرا لنموذج آينشتاين رغم نقص خطير به، فقد كان كونا فارغا. يبدو أن دى سيتر لم يعط هذا الأمر أهمية، فقد كان يقول: "إن كوننا قبل كل شيء هو فارغ تقريبا." بعد ذلك اتضح أنه لو وضع جسمان فى كونه فسوف يتباعدان، لقد كان كونه متمددا.

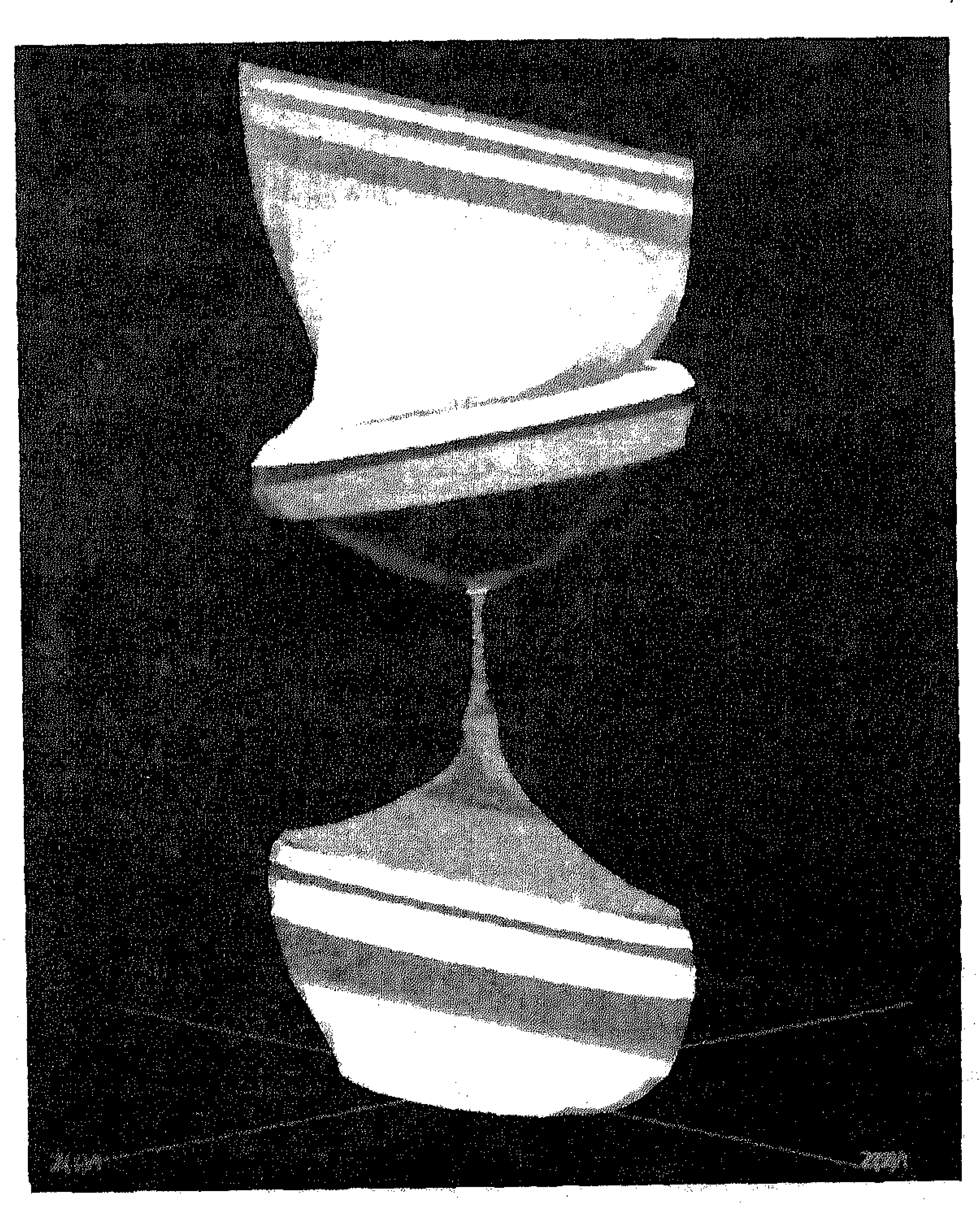
وظل الجدل مستمرا لعدة سنوات حول أى النموذجين أقرب للصواب. وفى أواخر العشرينات وأوائل الثلاثينات بين إدوين هابل مستخدما التلسكوب الهائل لجبل ويلسون أن المجرات تتباعد عن بعضها البعض. إن الكون متمدد بالفعل، وعلى الفور خرجت النظريتان من الساحة.

وباكتشاف تمدد الكون تصدرت نظرية جديدة الصفوف. لقد نظر رياضى روسى هو ألكسندر فريدمان Aleksander Friedmann فى معادلات النسبية وقرر أن يمضى فى الطريق الذى نكل عنه آينشتاين، النموذج الخالى من الثابت الكوني. وبعد أن استنتج المعادلات المعدلة، وجد أن النموذج الذى وضعه يؤدى إلى ثلاثة أكوان محتملة؛ واحد ذى انحناء موجب (على شكل كروي) يتمدد إلى قطر محدد، ثم ينحنى منغلقا على نفسه، وواحد ذى انحناء سالب (على شكل سرج حصان) يتمدد إلى مالا نهاية، والثالث مسطح يتمدد أيضا إلى مالا نهاية. كما بين فريدمان أن هناك قيمة حرجة لكثافة المادة فى هذه الأكوان، أعلاها يكون الكون ذو انحناء سالب، وأقل منها يكون ذو انحناء موجب.

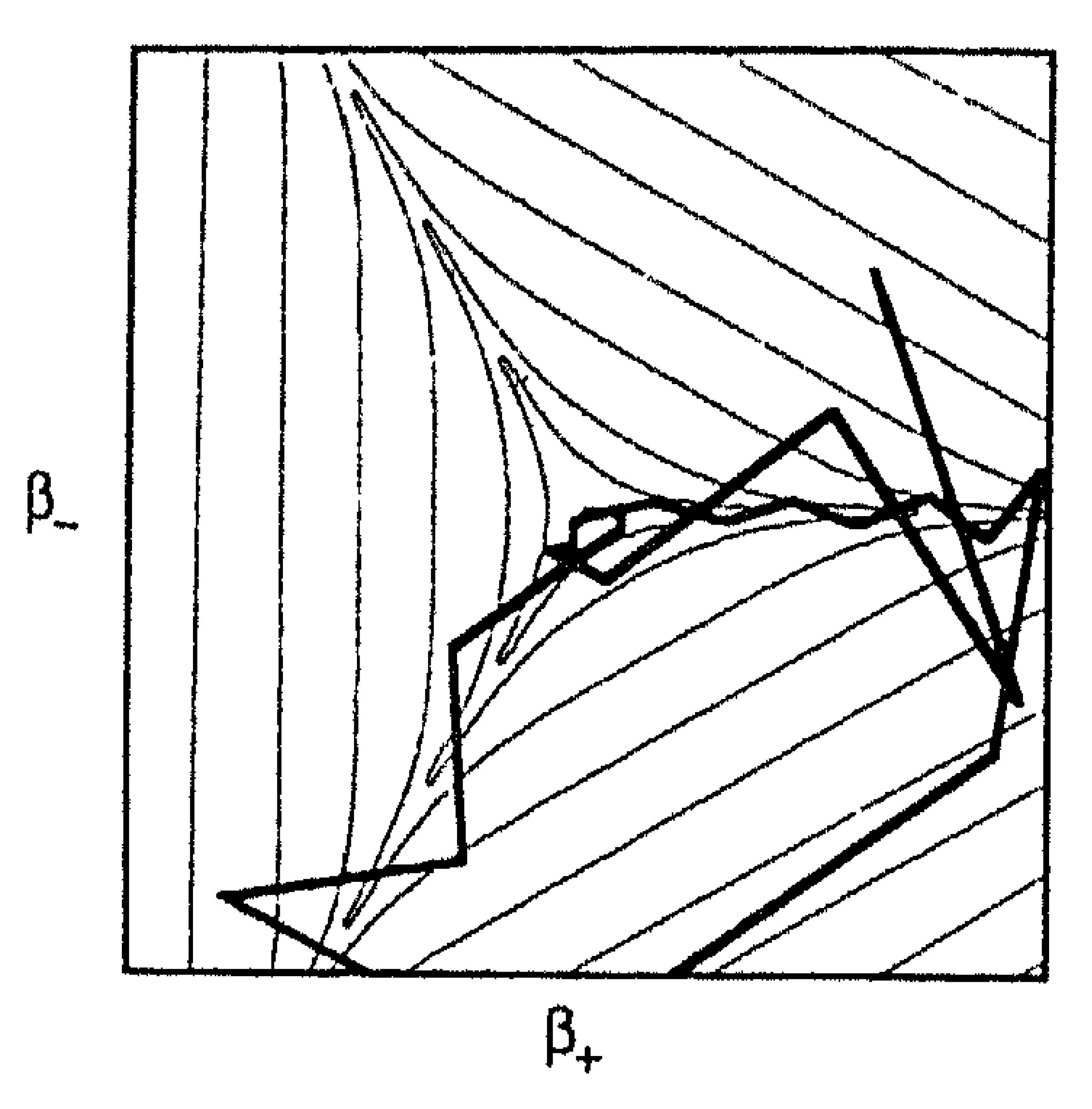
وسرعان ما قبل نموذج فريدمان، وعلى نهجه وضع نموذج معدل بواسطة روبرتسون Rovertson ووكر Walker فى الولايات المتحدة، ثم جمع النموذجان فيما يسمى نموذج فريدمان –روبرتسون– ووكر.

ولا تزال نماذج أخرى محتملة فى إطار عمل آينشتاين، ومما جذب انتباه الكثيرين منها فيما يختص بالهيولية ما يسمى "النموذج الخلطي" Mixmaster mode (مسمى باسم طراز من الخلاطات) Mixmaster، وهو ليس نموذجا واقعيا، و لكن له بعض الخصائص المثيرة تتعلق بالكون فى بداية نشأته. وضع هذا النموذج تشالز مينسر Charles Minster من جامعة ماريلاند عام ١٩٦٩, وكما يوحى الاسم فإن الكون الذى يصفه النموذج يعانى من فعل خلطي، فيتمدد فى اتجاهين وينكمش فى الاتجاه الثالث، . فحين يرى من خارجه يبدو وكأنه يتراوح بين فلطحة على شكل الفطيرة يثم مط على هيئة السيجار.

هذا النموذج هام لعدة أسباب، فأولا؛ فهو نموذج بسيط، والنماذج البسيطة هامة فى دراسة الهيولية. إن الأمر فى غاية الصعوبة أن تدرس الهيولية عن طريق معادلات آينشتاين كاملة، فهى غاية فى التعقيد. إن المطلوب لذلك هو حالات خاصة، مثل النموذج الخلطي. من ناحية أخرى فإنه قتل بحثا على مدى عقود من السنين، وبالتالى فهو مفهوم جيدا، إذ يمكن أن يبسط إلى مجموعة من المعادلات التفاضلية التى يسهل حلها.



التذبذب الهيولى للنموذج الخلطى للكون



مسار النموذج الخلطى للكون فى الفضاء الأعظم

ومن الأمور الهامة بالنسبة لنشأة الكون حالات عدم التجانس، والتى ظهر أن النموذج الخلطى ينتمى إليها. وقد بينت الأبحاث التى أجريت فى الاتحاد السوفيتى فى السبعينات أن الكون فى لحظات ميلاده الأولى، أو بالأحرى لحظة المفردة، سوف يحقق شيئا مماثلا للنموذج الخلطى. وفى عام ١٩٨٣ قرر أندرو زاردكى Andrew Zardeki من معمل لوس ألاموس الوطنى أن يتابع هذا الاتجاه، فوضع حلا رقميا للمعادلات. وقد بينت حساباته أن الكون كان متذبذبا عند خروجه من المفردة، وحين حسب رقم ليابونوف وجد أنه موجب، مما يبين أن التذبذب كان هيوليا. كما يصدق ذلك على لحظات الكون الأخيرة من عمره طبقا لنظرية الانسحاق العظيم.

وحين قرأ دافيد هوبل David Hobill من المركز الوطنى لتطبيقات الحوسبة الفائقة فى تشامانى بإلينويس أخذته الحيرة. ولد هوبيل فى ماساتشتستس وحصل على شهادته الجامعية من وورسيستر بوليتكنيك وشهادة الدكتوراه من جامعة فكتوريا بكندا، وكانت رسالته عن موجات الجاذبية. وبعد الحصول على الرسالة عمل فى موضوع تصادم الثقوب السوداء، وخلال ذلك قرأ عن الهيولية وفتن بها.

يقول هوبل: "حين اطلعت على أشكال زاردكى بدت متعارضة مع النتائج التقريبية للروس. فهو يقول إنك كلما اقتربت من المفردة فى حالتى الانفجار العظيم أو الانسحاق العظيم فإن الحالة تكون مشابهة للنموذج الخلطي. يعنى ذلك وجود اتجاهين للتمدد

واتجاه للانكماش. ولكن نموذجه قد يكون له ثلاثة اتجاهات للتمدد ومثلها للانكماش." وعلى الفور نشط لوضع نموذج حاسوبي خاص به ليحصل على نفس النتائج، ولكن حين تم تشغيل البرنامج لم يحدث ذلك، في حين كانت النتائج متفقة مع نتائج الروس. قام هوبل عندئذ بكتابة برنامج مستخدما نفس أسلوب زاردكي، ولكن للأسف، لم يحصل أيضا على نتائجه.

وضح أن في الأمر خطأ ما، وحين دقق هوبل فيما قام به وجد أن بعضا من محددات النظرية لم يلتزم بها في أسلوب زاردكي، وعلى حد قوله: "لو أن هذه المحددات لم تحترم فإن مجموعة معادلات آينشتاين برمتها لن تتحقق." وبالمزيد من التمحيص وجد أن عدم احترام تلك المحددات يدخل نوعا من الطاقة السالبة، هي ما يسبب الاهتزاز الهيولي. لم يقم دليل بعد على وجود الطاقة السالبة، ولكنها تصاحب حالة التضخم التي عاصرت نشأة الكون.

وقام هوبل بالمزيد من تفحص النتائج، وقام كما فعل زاردكي بحساب رقم ليابونوف وبين أنه صفر. ولكن العجيب أنه وجده ليس صفرا لو أنه لم يعتبر الزمن يؤول إلى مالا نهاية كما يقضي التعريف. معنى ذلك أن تعريفا "مخففا" لذلك الرقم ليس صفرا، ويقول عن ذلك: "إن وجهة نظري أنه بالتأكيد ليس هيوليا من وجهة نظر الهيولية القوية، ولكن حين تجعل التعريف مخففا تحصل على هيولية مخففة. أظن أن كل إنسان يعمل في المجال يقر ما يحدث، ولكن لا يوجد اتفاق على كيفية تعريف ما يحدث."

وأيدت مجموعتان أخريان وجود مشاكل في نتائج زاردكي في نفس الوقت الذي لاحظ فيه هوبل ذلك.

وبعد حصول هوبل على الدكتوراه التحق بجامعة كالجاري في إلينيوس حيث واصل بحث المشكلة، ولكن حينما وجد أن أغلب ذبذبات النموذج الخلطي تحدث في نطاق الكون الميكروسكوبي، وهو النطاق الذي يستحيل وصفه عن طريق النظرية النسبية، تراخى عزمه عن متابعة البحث في هذا الموضوع، ويقول تبريرا لذلك: "كنا نحاول أن نمد نطاق النظرية النسبية في خارج الحدود التي تصلح لها، وعلى ذلك فلم نكن لنصل إلى معرفة أي شيء عن فيزياء الكون في لحظاته الأولى."

وعلى ذلك فحتى إذا كانت الهيولية ليست معلنة رسميا، فإن المعلومات (العزوم، السرعة) تفقد على أية حال. إنها لا تفقد بالسرعة الكافية لتوصف بالهيولية، ولكنك إذا ما بدأت بكمية محدودة من المعلومات عن نظام ما، فإنها سوف تفقد في نهاية الأمر.

إن أحد المصاعب الجسيمة فى نظام بهذا الشكل هو التعرف على الهيولية، فهى يمكن أن تعرف بأكثر من طريقة، ولكن لكل واحدة مصاعبها. إن رقم ليابونوف حين يكون موجبا يعنى حالة هيولية، ويعنى ذلك أيضا وجود جاذب عجيب، أو وجود بعد كسري، أو فئة كانتور. ويحاول هوبيل أن يطبق تعاريف أخرى ليرى ما الذى يتمخض عنه البحث. إن اهتمامة الأساسى اليوم منصب على النماذج غير المتجانسة، فأغلب الأبحاث قد دارت حول النماذج المتجانسة منها، ولكن غير المتجانس منها - كما يرى هوبيل - هى الأكثر واقعية وإثارة.

وفى الآونة الأخيرة اهتمت بيفرلى برجر Beverly Berger من جامعة أوكلاند فى روتشستر بمينسوتا أيضا بموضوع النماذج غير المتجانسة. وقد ولدت برجر فى باترسون، وحصلت على شهادتها الجامعية من جامعة روتشستر، وحصلت على الدكتوراه من جامعة ماريلاند. وقد علمت بالنموذج الخلطى فى فترة مبكرة، فالمشرف على رسالتها هو تشالز مينسر واضع النموذج، ثم اهتمت بالأمر حين رأت أعمال كل من زاردكى وهوبل وما بينهما من تعارض، وحين تحيرت فيما بينهما، قررت أن تشق طريقا لنفسها.

تقول برجر: "أردت أن أفهم العلاقة بين الحلول الرقمية (التى اتبعها هوبل) والحلول التحليلية التقريبية التى اتبعها الروس. وكما فعل هوبل من قبل حسبت رقم ليابونوف ووجدته صفرا، ولكن حين وضعت نقطة انقطاع (بمعنى أنها لم تسمح للزمن أن يمضى إلى مالا نهاية، ولكن تركته يمتد إلى قيمة كبيرة) وجدت أنه قد أصبح موجبا وتتساءل: "إن السؤال هو هل هو هيولى أم لا، إن وجهة نظرى هو لماذا ننشغل بالمسميات طالما أننا نفهم ما يحدث؟".

تعمل برجر حاليا مع فينسنت مونوكريف Vincent Moncrief من جامعة ييل، وينظران، باستخدام الحواسب الفائقة، فى التصور الروسى بأن الكون البدائى غير المتجانس يظهر تصرفا خلطيا عند الاقتراب من المفردة. قد يكون هذا مهما فيما يتعلق بتكون المجرات والنسيج العام للكون، فالفلكيون ما يزالون فى تحير حول سبب حدوث عدم التجانس على المستوى الكبير. ومن الاحتمالات المثيرة أن تكون ذلك متضمنة فى معادلات آينشتاين.

يقول منكريف: "يتضمن البرنامج دراسة رقمية لتطور المفردات فى حلول معادلات آينشتاين، ليس من الضرورى أن يكون الهدف الهيولية، ولكن الهيولية قد تظهر." ثم يستطرد بعد برهة: "لست فى الواقع أتوقع تصرفا خلطيا أو هيوليا إلا فى حالات خاصة، ولكننا لا نملك تصورا آخر. إن كل ما نتوقعه هو انطلاق السعير حين نقترب من المفردة."

ويعمل ماثاو تشوبتويك فى مسألة مماثلة، فهو ليس مهتما بانهيار الكون بأكمله، ولكن بجزء صغير منه. إنه يحاول أن يحدد ما حدث حينما ينهار الإشعاع ليكون ثقبا أسود. وقد ولد فى مانيتوبا بكندا، وحصل على الشهادة الجامعية من جامعة براون وحصل على الدكتوراه من جامعة ب. س. ويقول: "لم أكن أبحث حقيقة عن الهيولية، بل فى انهيار كروى متماثل لكتلة تكون الطاقة فيها حركية تماما."

إن حدوث ثقب أسود من عدمه يعتمد على الشدة، وليس على الشكل، للنبضة الأولية. إنه هناك حقيقة حدا لذلك، وهو يقول عن ذلك: "من المدهش أننا وجدنا حلا وحيدا يردد هذه الخصائص، إن النظام ليس هيوليا، ولكن هناك لاخطية فى التصرف لها بعض خصائص الهيولية."

ويبحث ج. واينرايت J. Wainwright أيضا فى النموذج الخلطي، ويقول: "إن بحثى كان صياغة معادلات المجال لآينشتاين فى نظام ديناميكي. كانت الفكرة أن نحاول وصف التصرف الترددى فى الماضى بواسطة جاذب. لقد استطعت أن أصف الجاذب هندسيا، إنه ليس جاذبا عجيبا، بل جاذبا معتادا." وقد وصف النظام بأنه ضعيف الهيولية.

وأخيرا، فالهيولية قد وجدت أيضا فى الكون البدائى لفريدمان –روبرتسون– ووكر حينما اقترن بمجال ما. فقد بين استيبان كالزتا Esteban Calzetta وكلوديو إل–هاسي Claudio El Hasi من الأرجنتين أن الهيولية يمكن أن تحدث فى نظام كهذا، وقررا أن هذه الهيولية تحد بدرجة قوية من مقدرتنا على التنبؤ بالمجال عند الانسحاق العظيم عند معرفة قيمة معينة عند الانفجار العظيم.

إن دراسة الهيولية فى النظرية النسبية العامة والكون البدائى لا تزال فى مهدها، ولكن توجد شواهد أنها تلعب دورا مهما، ويعمل الكثيرون من الفيزيائيين على كشف مضامينها. إن تقدما كبيرا قد تحقق ومن المنتظر المزيد فى المستقبل.

(١) عالم هندي من أعظم علماء القرن العشرين في الفلك، وتلميذ سير إدنجتون، اكتشف رياضيا الأقزام البيضاء وهو في مطلع حياته العلمية، وجعل له حدا لاستقراره يعرف باسمه – المترجم

(٢) بني تنبؤ ميشيل ولابلاس بالثقوب السوداء على فكرة أن الضوء مكون من جسيمات، وهو ما قال به نيوتن في نظريته عن الضوء، وبعد أن نشر لابلاس كتابه المذكور في المتن، أجريت تجارب بينت أن الضوء هو في حقيقته موجات وليس جسيمات، فصارت الفكرة على غير أساس، ولذا فقد حذفها لابلاس من طبعات كتابه التالية. ومن الجدير بالذكر أن آينشتاين قد صالح بين النظريتين عن الضوء، فبين أنه جسيمات موجية أسماها الفوتون – المترجم

الفصل الرابع عشر

الهيولية فى النظرية الكمية والكون البدائى

ناقشنا إلى الآن ظاهرة الهيولية فى ثوبها الكلاسيكي، أى تلك التى تحدث فى نطاق الوصف الكلاسيكى (النيوتنى أو النسبوي) للنظم الفيزيائية. على أنه منذ منتصف القرن التاسع عشر بدأ العلماء يدركون أن ميكانيكا نيوتن لا تقدم إجابات تتفق دائما مع المشاهدات. فمعادلات نيوتن يمكنها أن تحسب مسار كرة مادية حين تقذف بقوة معينة فى اتجاه معين، ولكنها لا تصلح لحساب منحنى للإشعاع الحراري. كانت الحاجة ماسة لوضع منهج علمى جديد، يصلح لوصف الظواهر على مستوى العالم غير المنظور. وفى منتصف العشرينات تم ذلك متمثلا فى نظرية ميكانيكا الكم.١

ولكن إذا كانت الهيولية تبدو فى العالم الكلاسيكي، ألا يحتمل أنها تحدث أيضا فى عالم ميكانيكا الكم؟ لقد رأينا أن الكواكب والكويكبات فى النظام الشمسى يمكن أن تخضع للهيولية، ويمكننا بسهولة أن نتصور النظام الشمسى وقد أصبح فى حجم مجهري. بل إن الذرة يمكن أن ينظر إليها كنظام شبيه بالنظام الشمسى على مستوى ضئيل.

كما أننا نعلم أن النظم المهتزة كالبندولات والزنبركات والقضبان المرنة يمكن أن تدخل فى حالة من الهيولية، ولدينا على المستوى الذرى نوع من التذبذبات، فهل يمكن هى أيضا أن تكون عرضة للهيولية؟ قبل أن نخوض فى ذلك علينا أن نعرض لمسألة أخرى. إننا نعرف أن الهيولية تعنى عدم القدرة على التنبؤ، وأن نظرية ميكانيكا الكم تحتوى بالفعل على نوع من عدم التنبؤ، يعبر عنها بمبدأ "عدم اليقين". طبقا لهذا المبدأ ليس بإمكاننا أن نتنبأ بموضع إلكترون فى داخل الذرة بدقة مطلقة، ولكن كل ما نستطيعه هو تقدير احتمالي. وبنفس المنطق لا نستطيع أن نتنبأ أى من النويات فى

مادة مشعة سوف تشع ومتى، وكل ما فى استطاعتنا هو أن نقرر احتمال أن تشع خلال فترة زمنية معينة. وعلى ذلك فعلينا أن نميز بين عدم التنبئية النابعة عن الهيولية وقرينتها المنتمية لنظرية ميكانيكا الكم.

ومن جهة أخرى فنظرية ميكانيكا الكم مهمة فقط على المستوى دون الذري، وعلى ذلك فقد يعتقد أن الهيولية الكمية، بفرض وجودها، لن تكون هامة فى علم الفلك، وهو قول خاطئ تماما، ذلك لأن النظرية الكمية تشرح الكثير من الأحداث المرتبطة بنشأة الكون. فالطيف الذى يحلله الفلكيون يعتمد على هذه النظرية. كما أن وصف نسيج الكون على رحابته يعتمد على مفاهيم النظرية الكمية. فالفلكيون ليسوا متأكدين من سبب تشكل نسيج الكون بالصورة التى هى عليها، ولكن السبب يمكن أن يتلمس بالرجوع إلى لحظات ميلاد الكون، حين كان فى حجم مجهري، وهو ما يجعل النظرية الكمية أساسية فى فهم هذا الموضوع.

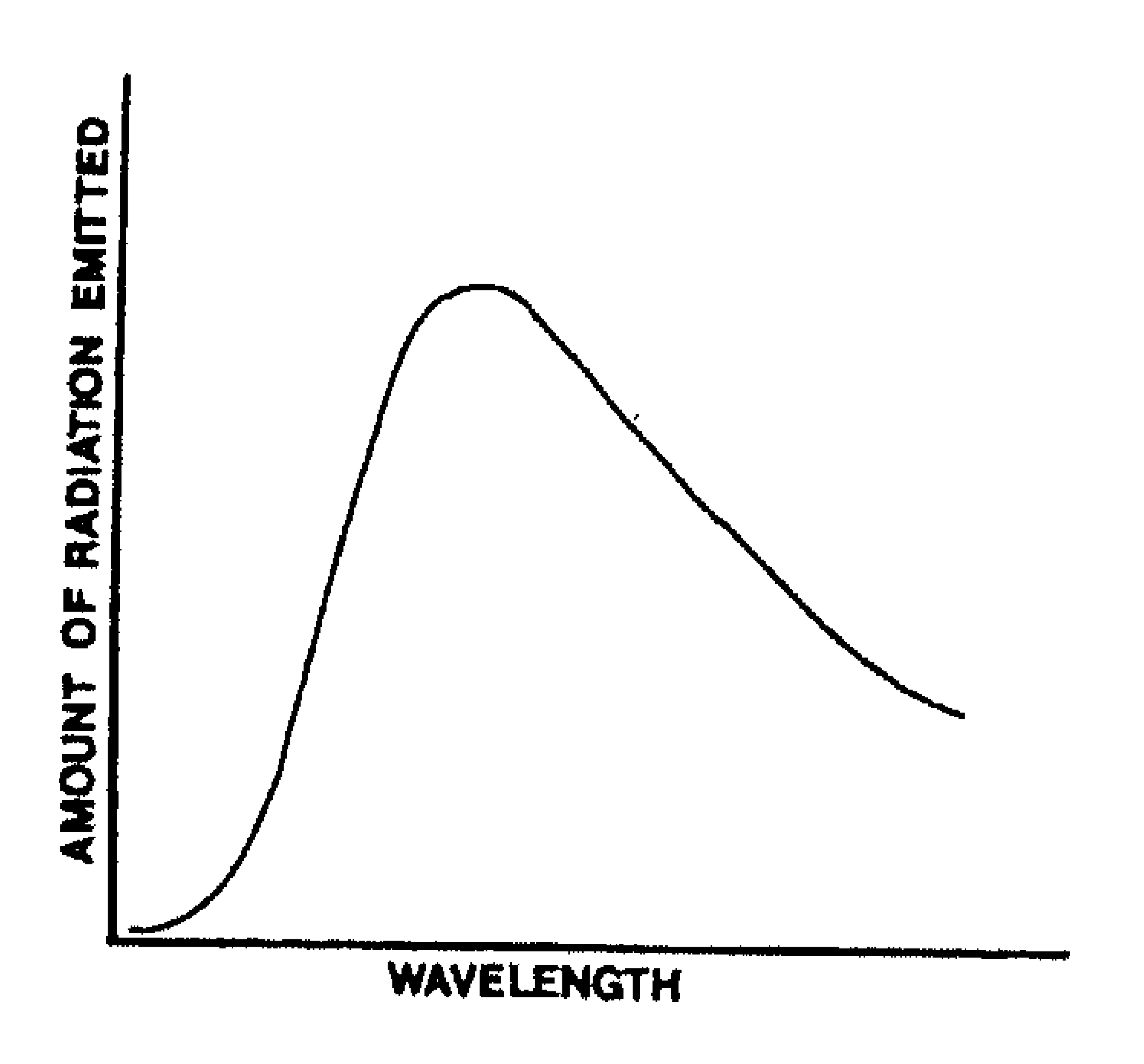
النظرية الكمية

ترجع جذور النظرية الكمية إلى عام ١٩٠٠ , فى ذلك الوقت كان من المشاكل العويصة التى تواجه العلم مشكلة الإشعاع الحراري. فالمعدن حين يسخن يعطى إشعاعات ذات ترددات مختلفة. والجسم المثالي للإشعاع، والذى يسمى الجسم الأسود، يكون له منحنى للإشعاع الحراري. فعند تسخين الجسم إلى درجة حرارة معينة، نجد أن شدة موجات الأشعة الحرارية المنبعثة منه ترتفع مع زيادة طولها إلى أن تصل إلى طول موجي معين، ثم تنخفض بعده للموجات ذات الطول الموجي الأعلى. وعند تسخين الجسم إلى درجة حرارة أخرى نجد أن الإشعاع الأكثر شدة قد تغيرت قيمة طوله الموجي. يمكنك تصور ذلك لو تخيلت كرة من الحديد تسخن، فمع ارتفاع درجة الحرارة تجد لونها يتغير بدءا من اللون الأحمر فالبرتقالى فالأبيض الضارب للزرقة.

بحث الفيزيائيون طويلا عن معادلة تفسر هذه الظاهرة دون جدوى، لم يكن أحد يعرف تعليلا لهبوط المنحنى بعد ارتفاعه.

ثم جاء ماكس بلانك، أستاذ شاب فى علم الفيزياء بجامعة برلين. وحين أدرك بلانك أن الأسلوب التقليدى فى التفكير لن يقدم حلا للمشكلة، انتهج نهجا آخر. إن نمط التفكير السائد يتصور الإشعاع سيالا متصلا، فوضع بلانك افتراضا مضادا بأنه ينطلق فى صورة وحدات، سمى كل وحدة "كم" quanta، واضطر لافتراض لنظريته ثابتا يسمى "ثابت بلانك"، وجعله هذا الافتراض على شك من صحة نظريته.

ولكنها نجحت، وحققت المعادلة التى وضعت على أساسها كافة النتائج. وفى حين اعتبرت هذه النظرية كارثة على الفكر العلمى التقليدي، لم يكن يعلم بلانك وقتها أنه حقق فتحا أدى إلى ثورة علمية خطيرة.

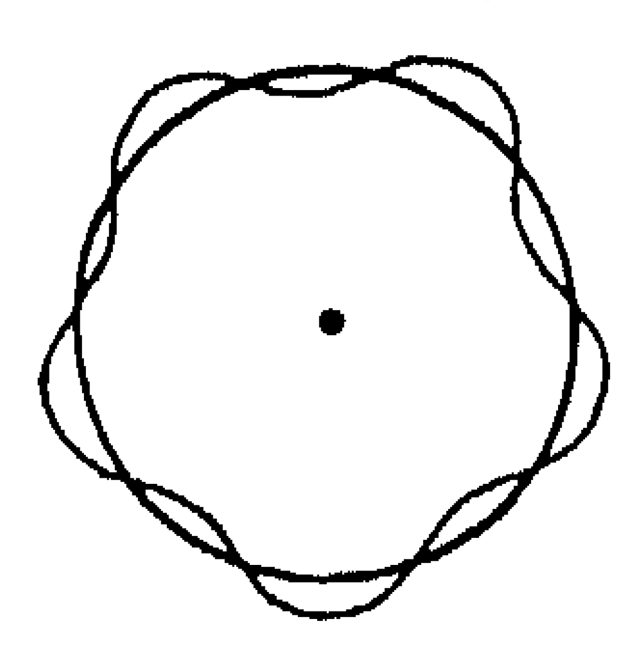


منحنى العلاقة بين كمية الإشعاع والطول الموجى

وسرعان ما أدرك العلماء أن ثابت بلانك له علاقة بتركيب الذرة. فرذرفورد كان قد بين أن الذرة أشبه بنظام شمسى مصغر، توضع النواة فيه مكان الشمس والإلكترونات مكان الكواكب. وحين أعجب العالم الهولندى نيلز بور (يكتب اسمه أحيانا بوهر) Neils Bohr بالأفكار المستحدثة لنظرية بلانك قرر تطبيقها على النموذج الذرى لرذرفورد، وسر للغاية أن استطاع أن يفسر خطوط الطيف التى تنبعث من ذرة الهيدروجين (والتى يمكن أن ترى حين يعرض ضوء المنبعث منها للمطياف) لو افترض أن الكواكب تحتل مستويات محددة حول النواة، وأن لثابت بلانك دورا فى تحديد مسافات هذه المسارات. فحين تقفز الإلكترونات بين المستويات فهى إما تمتص أو تشع فوتونات ضوئية، هى التى تشكل الطيف الذري. ونجحت نظرية بور فى حساب كافة الخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين، ولكنها حين طبقت على الهيليوم لم تحقق نفس النجاح.

اتخذ بور بلا شك خطوة ناجحة على الطريق، ولكن بقى فهم سبب نجاح هذه النظرية. وجاء ذلك بعد عدة سنوات من جهة غير متوقعة، على يد أمير فرنسى هو لويس دى بروليى (يكتب اسمه أحينا دى بروجلي) Louis de Broglie. إن من المعروف أن

الضوء هو موجات، وافترض دى بروليى أن الجسيمات تكون مصحوبة أيضا بموجات. على هذا الأساس فإن الإلكترون يكون مصاحبا بموجة مستقرة. والموجة المستقرة هى ما يحدث حين تهز حبلا بحيث تكون قمم تموجاته ثابتة فى نفس المكان، أى لا تتحرك على طول الحبل. فطبقا لرأى دى بروليى فإن مدارات الإلكترون حول نواة ذرة الهيدروجين يجب أن تكون بحيث تضم عددا صحيحا من الموجات المصاحبة للإلكترون.



الموجة المستقرة كما تصورها دى برليى

وقف العلماء وقفة غير ودودة من فكرة دى بروليي، ولكن حين اهتم آينشتاين بالأمر علموا بأهميته، وفى العام التالى كشفت التجارب التى أجراها كلينتون دافيدسون Clinton Davidson من معامل بل بالولايات المتحدة عن هذه الموجات.

وسرى النبأ كالنار فى الهشيم، وحرص كافة العلماء فى أقطار الدنيا على التعرف على النظرية الجديدة. وقد طلب من إروين شرودنجر Erwin Schrädinger، أستاذ بجامعة زيورخ ذات مرة أن يلقى محاضرة عنها، وبعد أن قام بذلك سأله أحد الحاضرين: "بروفسور شرودنجر، إنك تحدثت عن الموجات، ولكن أين هى معادلتك الموجية؟". وفكر الأستاذ فى الأمر، نعم، إن المطلوب هو وضع معادلة موجية، ولكن، كيف يمكن تمثيل الموجة؟ وقرر شرودنجر أن يستخدم "الدالة الموجية" التى وضعها وميزها بالحرف الإغريقى "بساي"، وكتب لها معادلة تعتبر اليوم من أهم معادلات الفيزياء.

وفعل شرودنجر ما هو أكثر. فقد وضع أساسا لوصف جديد للذرة والإشعاعات مؤسسا على الموجات، نظرية يشار لها أحيانا بالميكانيكا الموجية. وقد تمكن بالفعل على مدى الشهور التالية أن يحل بعضا من المسائل العويصة فى الفيزياء.

ولكن ما هى طبيعة الدالة الموجية بالضبط؟ لم يكن أحد، بما فى ذلك شرودنجر نفسه، متأكدا من الإجابة. كان شرودنجر يتصور أنه بطريقة أو بأخرى قد وصف

الإلكترون على صورة "حزمة موجية"، ولكنه سرعان ما اكتشف أن مثل هذه الحزمة مآلها للتشتت. وفى عام ١٩٢٦ اقترح ماكس بورن Max Born من جوتنجن Gáttengen أن الموجة لا تمثل الإلكترون ذاته، بل هو موجة احتمالات، بمعنى أنها تعطى احتمال وجود الإلكترون فى موضع معين، وهو التفسير المقبول اليوم.

وفى نفس الوقت الذى نشر فيه شرودنجر نظريته نشرت نظرية مؤسسة على مفاهيم مختلفة تمام الاختلال (استخدمت مصفوفة من الأعداد) وضعها فرنر هايزنبرج Werner Heisenberg من ألمانيا. وقد أعطت نظريته بعضا من نتائج نظرية شرودنجر. وقد يبدو غريبا أن تعطى نظريتان مختلفتان تماما نفس النتائج، فما معنى ذلك؟ لم يكن أحد متأكدا فى البداية، وبعد ذلك بين شرودنجر أنهما وجهان لنفس العملة.

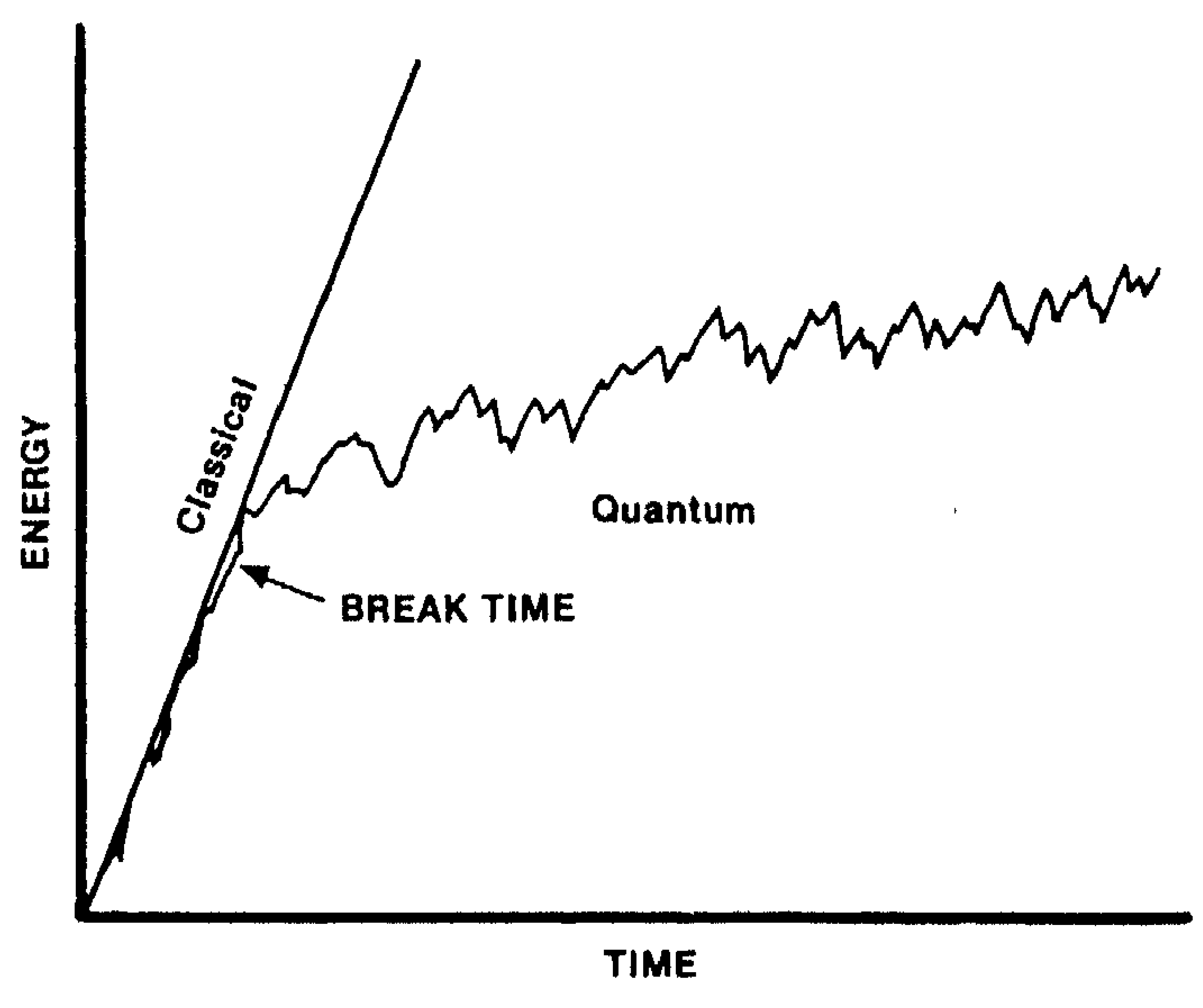
وقرب نهاية العشرينات كانت نظرية ميكانيكا الكم قد رسخت وطبقت فى حل الكثير من المسائل. كانت نظرية رائعة نجحت تماما فى العالم الذري. ولكنها كانت مختلفة تمام الاختلاف عن الميكانيكا التقليدية. فهى على عكس الثانية قد حصرت مواضع الجسيمات فى سلسلة من مستويات الطاقة، بحيث أن الجسيمات تحتل فى أغلب الأوقات المستوى الأدنى، وهو ما يسمى الحالة الأرضية. أما إذا امتص جسيم طاقة إشعاعية، فإنه يرتفع إلى مستوى أعلى، فيما يسمى الحالة المستثارة.

الهيولية الكمية

إننا لا نستطيع أن نرى العالم الذرى رؤيا العين، ولكننا من خلال التجارب نعلم أن تطبيقنا لمعادلات النظرية الكمية على العالم الذرى تؤتى نتائج باهرة. ومن جهة أخرى فإننا نعلم أيضا أن النتائج التى تأتى من تطبيق النظرية الكلاسيكية للعالم المرئى باهرة بدورها. معنى ذلك أن هناك منطقة ما تتلاقى فيها النظريتنان. بمعنى آخر، فإن النظريتان فى نطاق ضيق يجب أن يأتيا بنفس النتائج. وقد أحس نيلز بور بهذه الحقيقة وصاغها فى مبدأ أسماه "مبدأ التعادلية" correspondence، وينص على أنه فى النهاية، حين يمكن إهمال التأثيرات الموجية، فإن النظريتان متعادلتان فى النتائج.

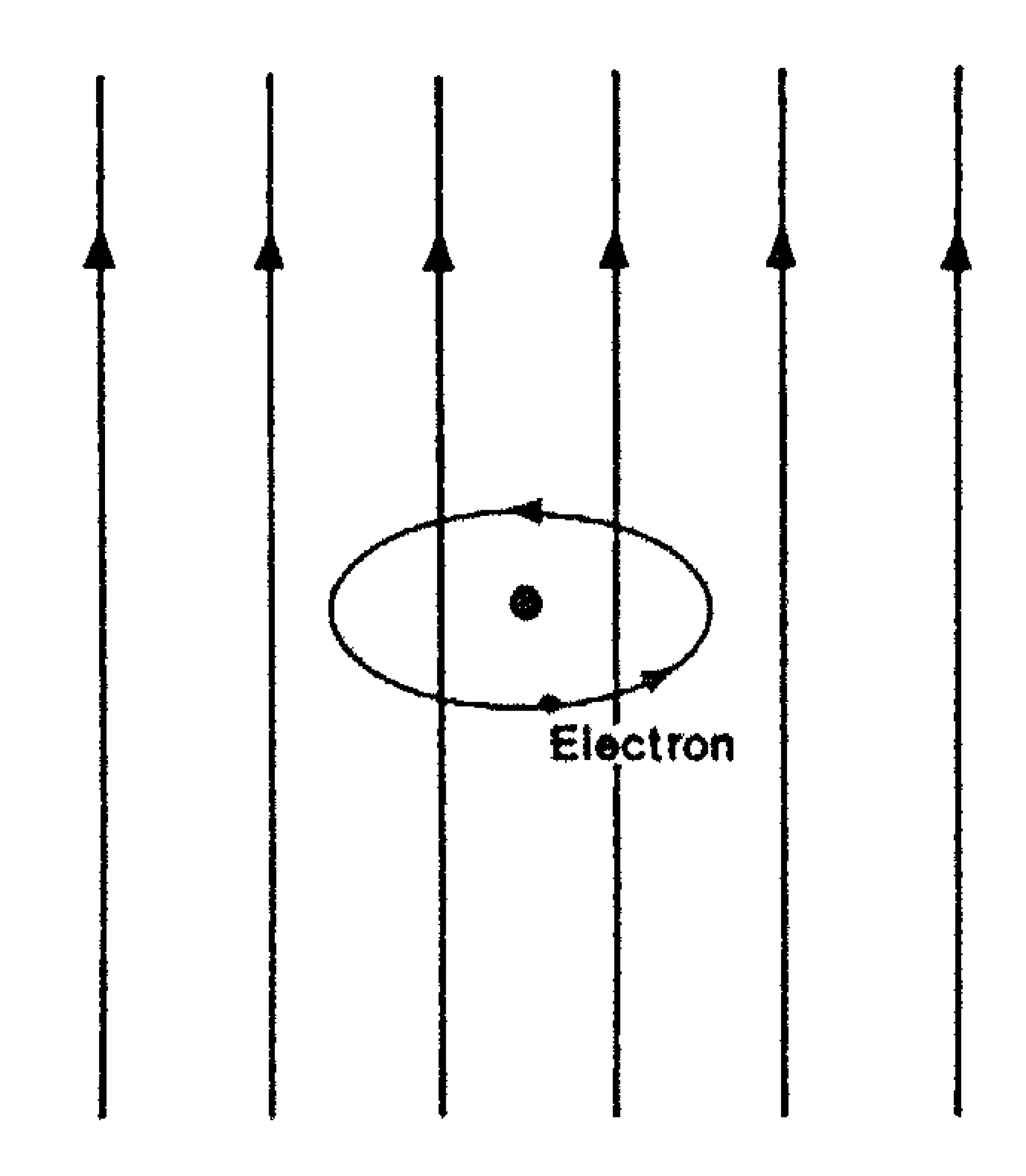
ومن أفضل الأماكن التى نرى فيها هذا التحول ذرة الهيدروجين. فحين تكون طاقة الإلكترونات منخفضة، تكون مستويات الطاقة لها متباعدة، ولكن حينما تعرض

الإلكترونات للإشعاع بالتردد الملائم ترتفع الإلكترونات إلى مستوى أعلى من الطاقة، فتتقارب فيما بينها. وفى الواقع فإننا كلما ارتفعنا فى الطاقة تتقارب مستوياتها إلى أن تندمج جميعها فى كل متصل، هنا يحدث التحول. فالنظرية الكلاسيكية تنظر للطاقة على أنها كمية متصلة، وهو ما تكون عليه الإلكترونات بالفعل فى هذه الحالة النهائية.

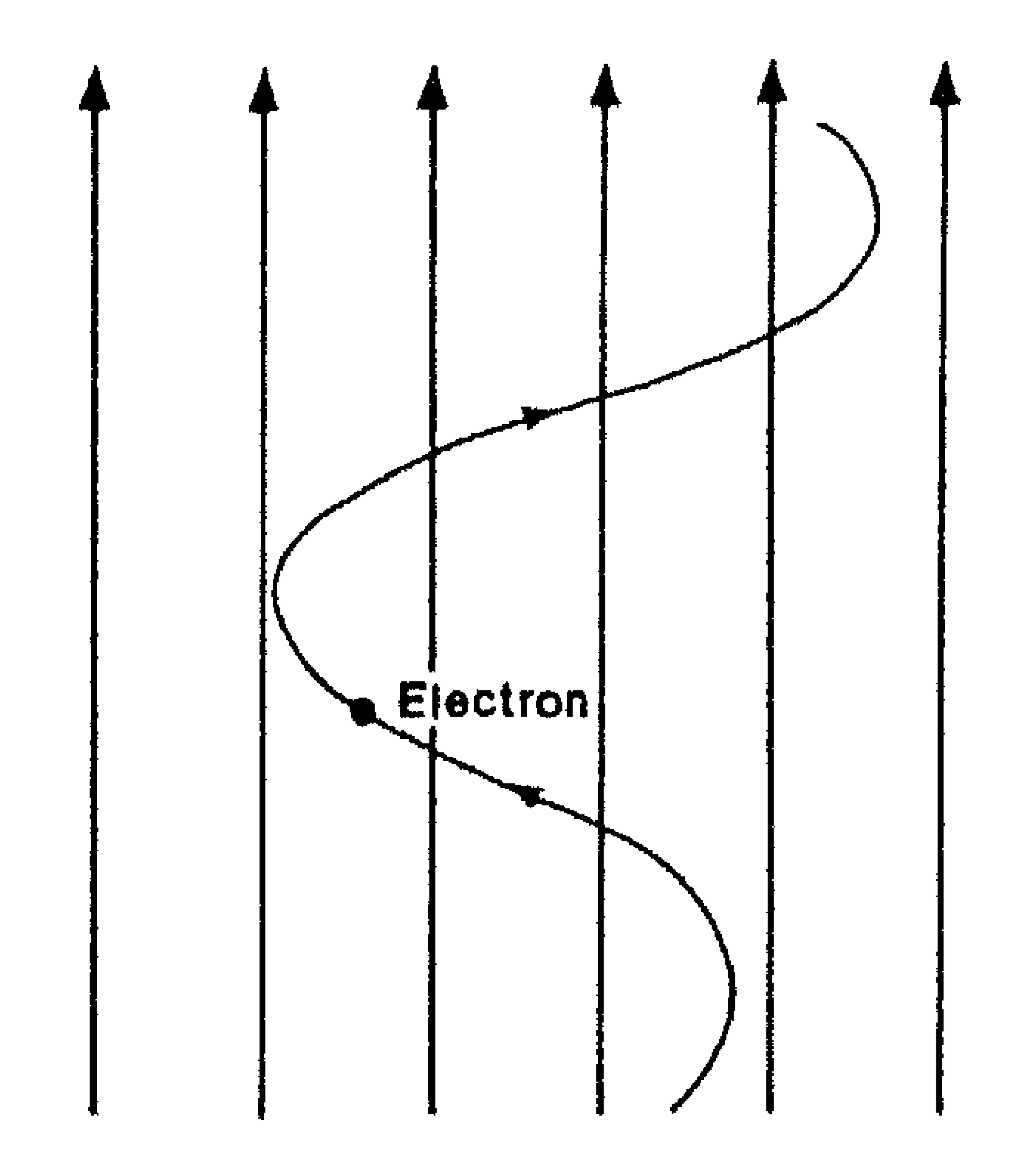


الانفصال بين النظام الكلاسيكى والكمى

والسؤال الذى يفرض نفسه هنا هو: ما لو كان النظام الكلاسيكى هيوليا؟ هل يستمر على حالته هذه حين ينتقل إلى العالم الكمي؟ وإذا كانت الإجابة نفيا، ما الذى يحدث؟ كذا نرى على التو موطن المشكلة، فعلى المستوى الكلاسيكى تكون الظواهر هيولية حين توصف بمعادلات لاخطية، ولكنها حين تنضوى تحت لواء النظرية الكمية فإنه توصف من خلال معادلة شرودنجر، وهى معادلة خطية. يوحى لنا ذلك أن الهيولية مستحيلة فى العالم الكمي، فهل تخلع الظواهر هذه الصفة عن نفسها حين تتحول من العالم المرئى إلى العالم المجهري؟



MAGNETIC FIELD



إلكترون فى مجال كهربى، أعلى: المجال ضعيف فيبقى الإلكترون فى مداره،
أسفل: المجال قوى يؤثر على مسار الإلكترون

بدأ عدد من الباحثين التفكير فى هذه المشكلة حوالى عام ١٩٨٨، وكان المنهج نظريا استخدمت فيه نماذج تقريبية. ورغم ذلك فقد أعطتنا رؤية جيدة للموضوع. كان من المنخرطين فى هذا النشاط جوزيف فورد Joseph Ford من أطلنطا بجورجيا وبوريس تشيريكوف Boris Chirikov وفليكس إزراييليف Felix Izraelev من الاتحاد السوفيتى وجويليو كاساتي Giulio Casati من إيطاليا. فهم قد افترضوا إلكترونا فى حالة مستثارة تجعله قريبا من حالة التحول بين حالتى الميكانيكا الكلاسيكية والتقليدية، وبحثوا ما يحدث له عندما يتلقى دفعات من الطاقة. من المنظور الذرى تأتى هذه الدفعات على صورة نبضات من الإشعاع الكهرومغناطيسي، وتعتمد شدتها على موضع الإلكترون فى مداره. أما من المنظور الكلاسيكى فإنها تكون عبارة عن عدة صدمات. فإذا كان النظام غير هيولى (كلاسيكيا) فإنه لن يمتص شيئا من الطاقة، وإذا ما كان هيوليا فإنه سوف يمتص طاقة بمعدل متوسط ثابت.

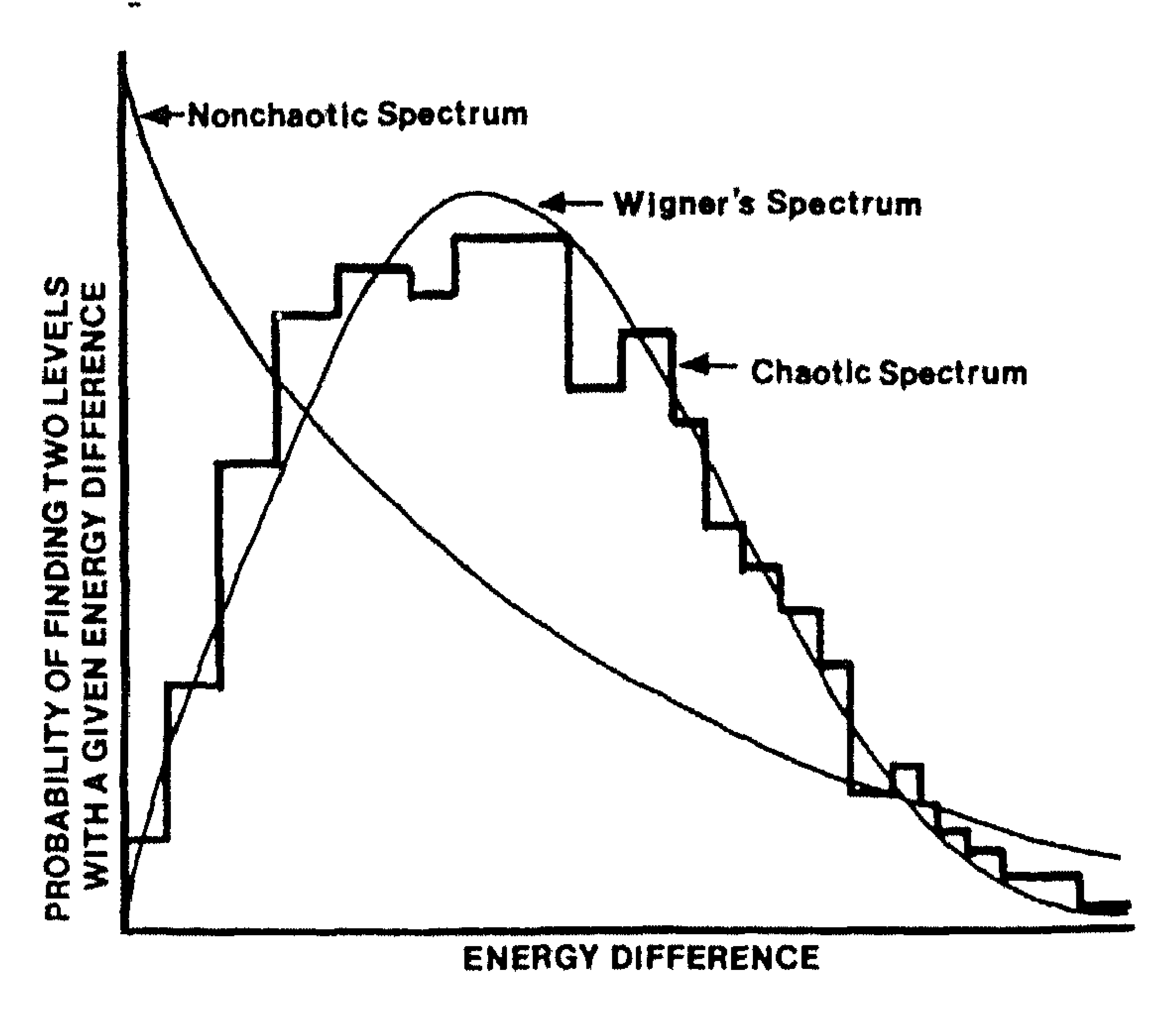
ما الذى يحدث حين يدخل نظام كهذا مرحلة التحول بين الحالتين؟ وجد الباحثون أن النظريتين أعطيتا فى البداية نتائج متماثلة، ثم بعد حين تحولت حركة الإلكترون فى المنظور الكمى إلى حركة شاذة، ووضح أن الميكانيكا الكمية تخمد حالة الهيولية الكلاسيكية. ولكن ماذا عن مبدأ التعادلية؟ لقد اتضح أنه لا يزال ساريا، فلو أننا اخترنا جسيما أثقل من الإلكترون، فإن التعادل سوف يستمر مدة أطول قبل أن يحدث التباين.

إن إجراء تجربة بهذا الخصوص أمر عسير، ولم تجر بصورة كاملة إلى اليوم. ولكن ما نفذ منها بين أن إخماد الحالة الكمية للهيولية أمر حقيقي، على أننا سوف نرى أنه يوجد نوع من الهيولية فى هذه المنطقة.

إن ذرة الهيدروجين لبساطتها مفيدة فى تتبع حالة الهيولية. لنبدأ إذن بحالة ذرة هيدروجين، إلكترونها فى الحالة الأرضية (المستوى الأدنى للطاقة). إذا ما وضعت الذرة فى مجال مغنطيسى ضعيف، فإن الإلكترون يظل دائرا فى مداره كالمعتاد، فقوة جذب النواة له أكبر من أن تجعله يتأثر بذلك المجال، هنا لن نرى حالة الهيولية. ولو كان المجال قويا، فإننا أيضا لن نرى حالة الهيولية، لأن الإلكترون سوف ينساق مع

ذلك المجال الذى تغلب على قوة جذب النواة. أما لو أن القوتين متقاربتان، فإنه يصبح وضعا محيرا للإلكترون، وهنا تتشابه حالة الهيولية.

فإذا ما مثلنا ما يحدث بيانيا، سنجد شيئا مثيرا. لقد ظهرت الهيولية وفقد بالتالى أى نظام فى حالات مستويات الطاقة المستثارة. ولكن لندرس المسافات بينها من الناحية الإحصائية، أو التوزيع الإحصائى للمسافات بين المستويات. إذا ما قمنا برسم المدرج التكرارى فى حالة كون الإلكترون هيوليا نحصل على الشكل التالي:



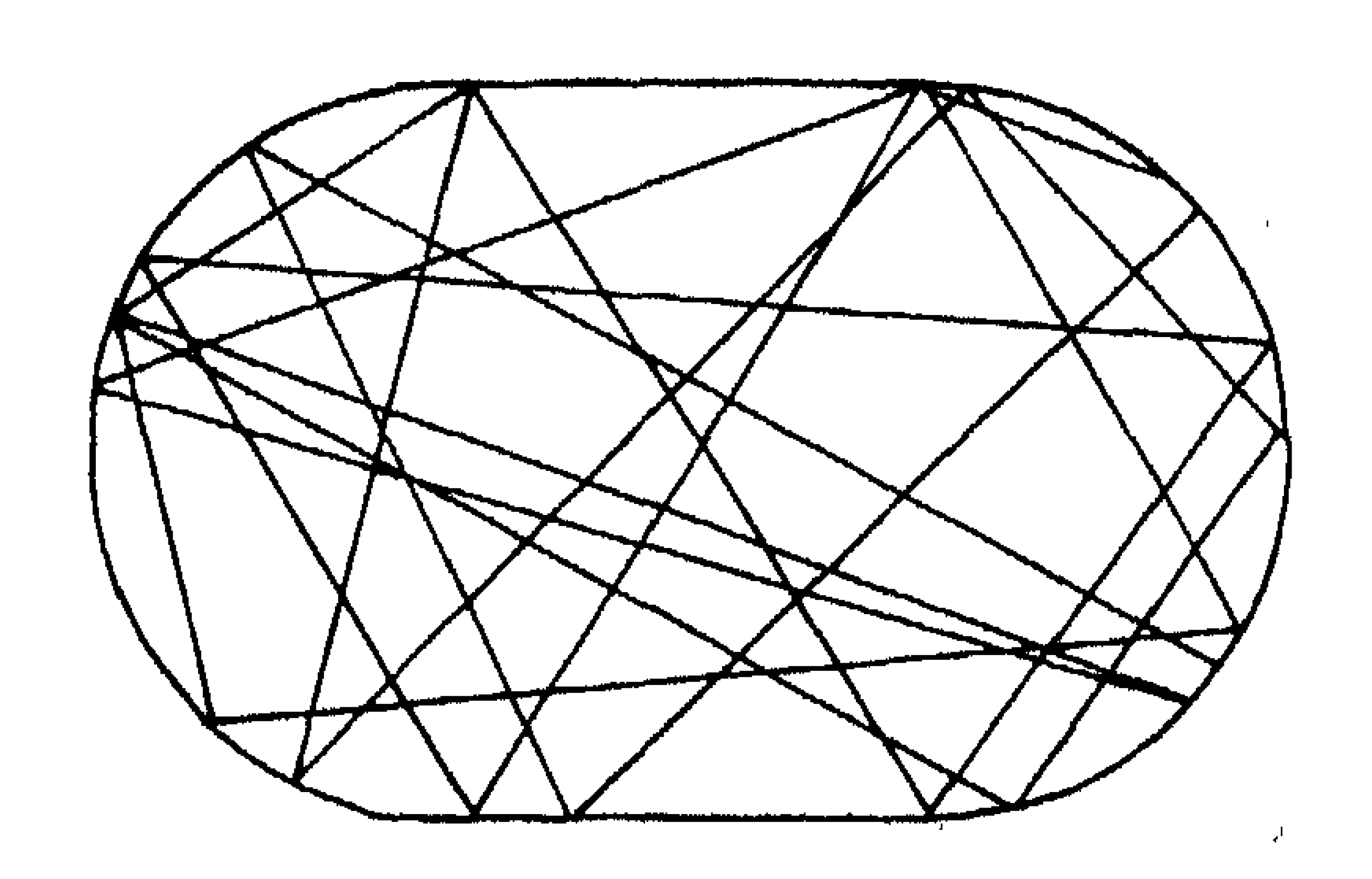
المدرج التكرارى للمسافات بين مستويات الطاقة

إن المنحنى المتصل الذى يتتبعه المدرج التكرارى هو ما استنبطه العالم يوجين فيجنر Eugene Wigner للذرات المعقدة، ولكنه ينطبق أيضا على حالة ذرة الهيدروجين حين توضع فى مجال مغناطيسي. وقد قام بذلك بتطبيق نظرية تسمى "المصفوفة العشوائية" random matrix، وهى لا تعطى المسافات لمستويات الطاقة بدقة، ولكنها تعطى تقديرات إحصائية للفروق بينها.

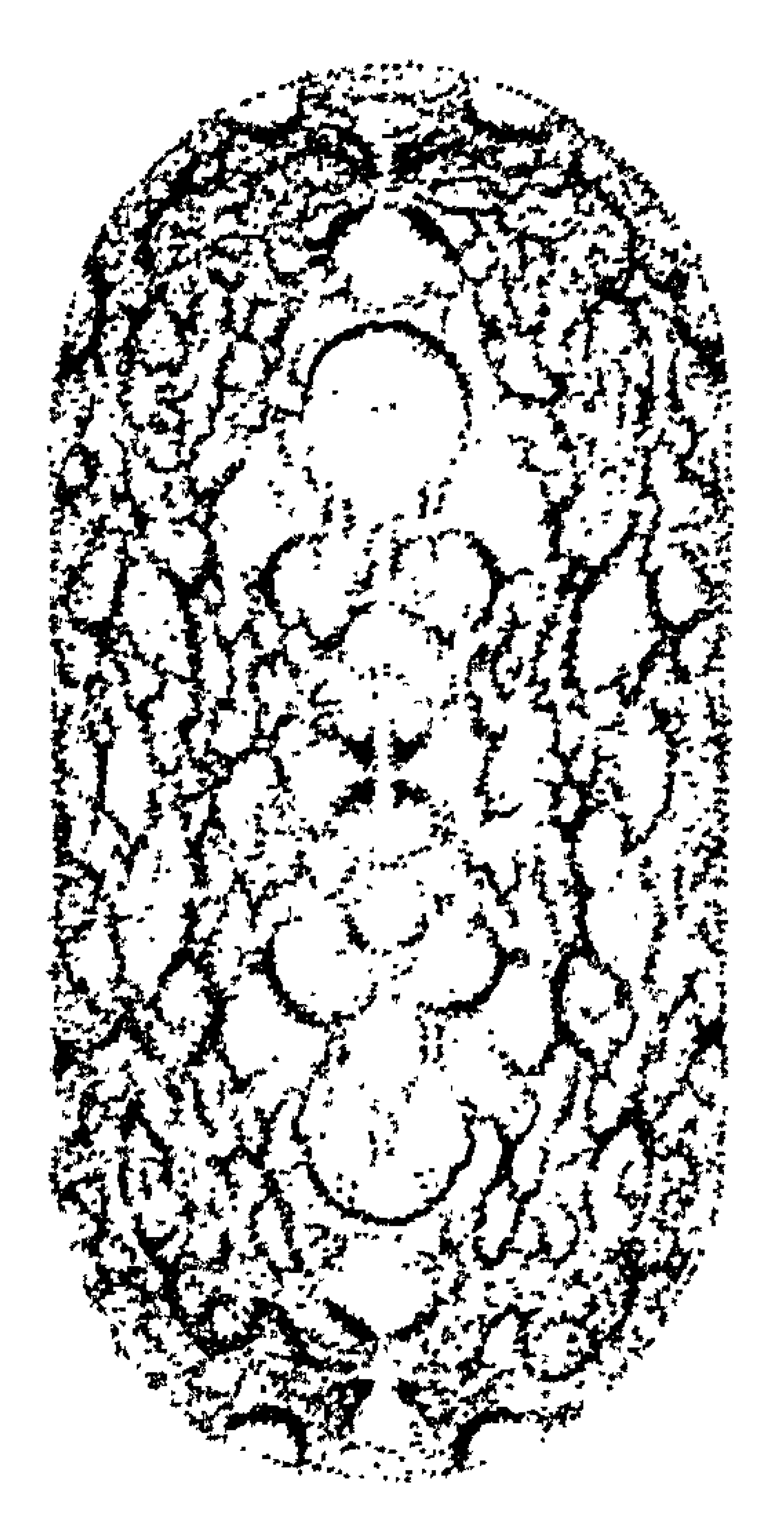
ويبين لنا الشكل أن الفروق ليست عشوائية كما قد نتصور. خذ الحالة الأولية حين تكون المسافات متساوية بصورة تقريبية، أى على نفس المسافة فيما بينها، إن التوزيع تراه يتكدس حول قيمة معينة. فلو أن التوزيع كان عشوائيا لوجدنا عددا كبيرا من الفروق الصغيرة، ولتتبع المنحنى التكرارى ما يسمى "توزيع بواسون" Poisson distribution. إن مستويات ذرة الهيدروجين فى مجال مغناطيسى تتبع هذا التوزيع فى حالة عدم وجود الهيولية. إن الشاهد على وجود الهيولية هو أن تتباعد المستويات بقدر الإمكان، وهو مالا يحدث فى حالة عدم الهيولية.

موضع آخر لتقصى حالة الهيولية فى مضمار نظرية ميكانيكا الكم هو تحديد موضع الإلكترون فى ذرة الهيدروجين. إن موضعه لا يمكن أن يحدد بدقة كما فى الميكانيكا الكلاسيكية، بل يمثل بسحابة احتمالية يمكن أن تعطى موضع الإلكترون بدرجة معينة من الاحتمال. إن مداره حول النواة إذن يكون على شكل سحابة.

مرة أخرى يمكننا أن نقارن بين الميكانيكا الكلاسيكية والكمية فى وصفهما لموضع الإلكترون حين توجد حالة الهيولية الكلاسيكية. لنفرض أن لدينا كرة ترتد على جوانب صندوق. من المعلوم أنه لو كان الصندوق ذا شكل هندسى بسيط، كدائرة أو مستطيل، فإن مسار الكرة يمكن أن يقدر حسابيا بدقة تامة. أما حين يكون الصندوق على شكل غير بسيط، كما هو مبين مثلا فى الشكل التالي، فإن مسار الكرة يكون هيوليا.



مسار هيولى لكرة ترتد على جوانب صندوق ذى شكل غير بسيط هندسيا



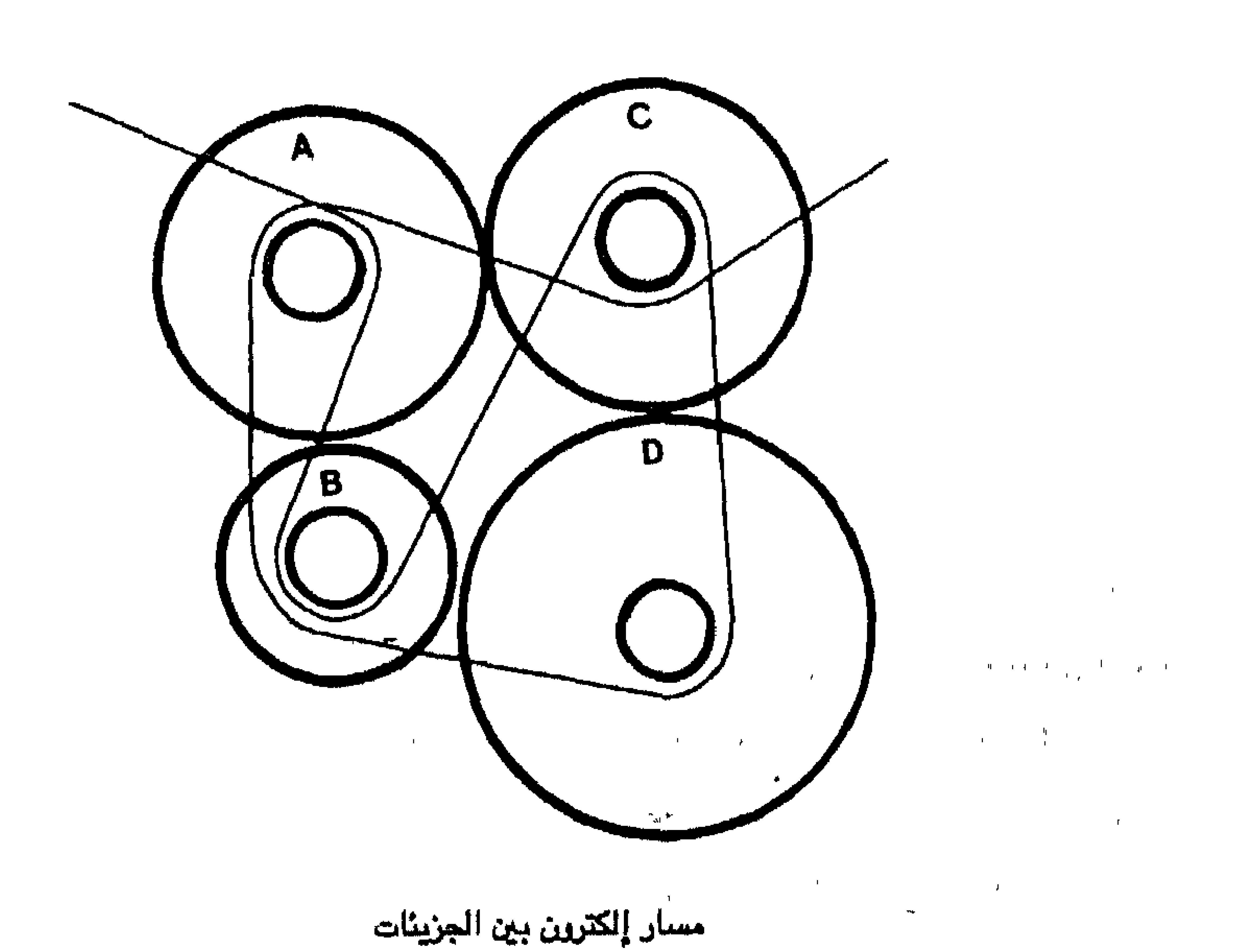
تمثيل لمسار جسيم فى صندوق غير بسيط هندسيا، تتركز أغلب الحالات فى قنوات ضيقة

إن الحالات المستقرة (الأنماط الموجية التى لا تتغير مع الزمن) فى المثال الميكانيكى الكمى المناظر لهذا المثال قد قام بحسابها إيرك هيلر Eric Heller من جامعة واشنطون فى بداية الثمانينات، وقد توصل إلى نتائج مثيرة. لقد وجد أن أغلب تلك الحالات تتمركز حول مناطق معينة، معطية أشكالا غريبة على مدى التشكيل بأكمله. كانت فى الواقع شبيهة بحالات الهيدروجين المستقرة فى مجال مغناطيسى قوى، ورغم أن ذلك ليس دليلا قطعيا على حالة الهيولية، ولكنه يبدو شبيها بها. الأكثر من ذلك فإن مقاطع بوانكريه لإلكترون ذرة الهيدروجين فى مجال قوى يبين أنه فى حالة من الهيولية فى بعض المناطق.



مقطع بوانكريه لذرة هيدروجين

من المواضع الأخرى التى تظهر فيها الهيولية فى العالم الكمى هو التشتت، مثلا فى حالة تشتت الإلكترون بسبب عدد من الجزيئات (انظر الشكل).



مسار إلكترون بين الجزيئات

بينما يشق الإلكترون طريقه بين الجزيئات يمكن أن يكون مساره معقدا للغاية. إن أية فروق طفيفة فى زاوية دخوله أو طاقته الابتدائية تسبب فروقا كبيرة فى مساره. من جهة أخرى فإنه كلما طال المسار كانت المسارات المحتملة أكثر. إن المسار يمكن حسابه فقط باستخدام ميكانيكا الكم، وبما أنها حساسة للظروف الابتدائية فإن حالة الهيولية تكون متحققة.

وأخيرا، فقد اكتشفت مؤخرا علاقة عجيبة بين الهيولية الكمية ونظرية الأعداد. إن مغزاها لم يفهم بعد بصورة كاملة. ففى عام ١٨٥٩ كان الرياضى الألمانى جورج ريمان Gorge Reimann يدرس التوزيع الخاص بالأعداد الأولية، واستنبط معادلة تسمى "معادلة زيتا" تعطى هذه الأعداد. إن أحدا لم يثبت بعد هذه المعادلة نظريا، ولكن التطبيق يبين أنها صحيحة إلى بلايين من الأعداد.

وقد بين أندرو أودليزكو Andrew Oldyzko من معامل بل أن توزيع المسافات بين مستويات الطاقة حين لا يوجد تماثل بسبب حالة الهيولية هى نفس المسافات بين القيم الصفرية لمعادلة زيتا. بل لقد أثبتت نظرية مؤخرا تقول بأن معادلة زيتا يمكنها أن تصف التصرفات الهيولية التى يمكن أن تنتاب كافة النظم الكمية.

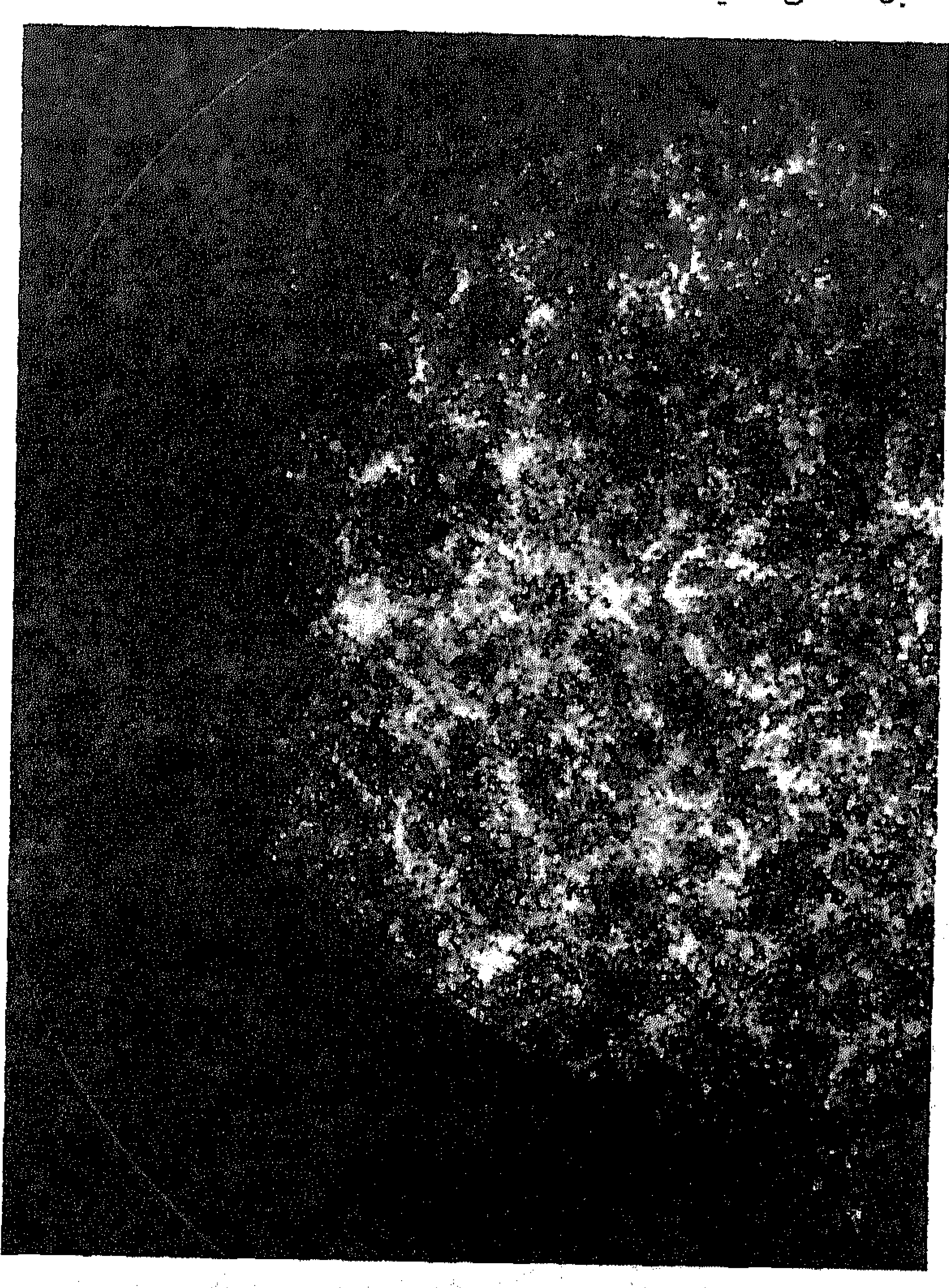
الهيكل الكونى على المدى الواسع

والآن، وبعد أن تعرفنا بقدر ما على هيولية العالم الكمي، نسأل: ما علاقة ذلك بعلم الفلك؟ توجد فى الحقيقة عدة مواضع تكون هذه العلاقة قوية، منها الهيكل الكونى على المدى الواسع. فى الفصل السابق بينا أن عددا من العلماء يحاولون الكشف عما إذا كان لهذا الهيكل علاقة بالنموذج الخلطى لبداية نشأة الكون، ولكنا رأينا أن الترددات الخلطية مرتبطة غالبا بالعالم الكمي، وهو من الصغر بحيث لا يمكن أن يوصف من خلال النظرية النسبية العامة. إنه يمكن أن يوصف من خلال صورة كمية لتلك النظرية، وهو مالم يتحقق إلى الآن.

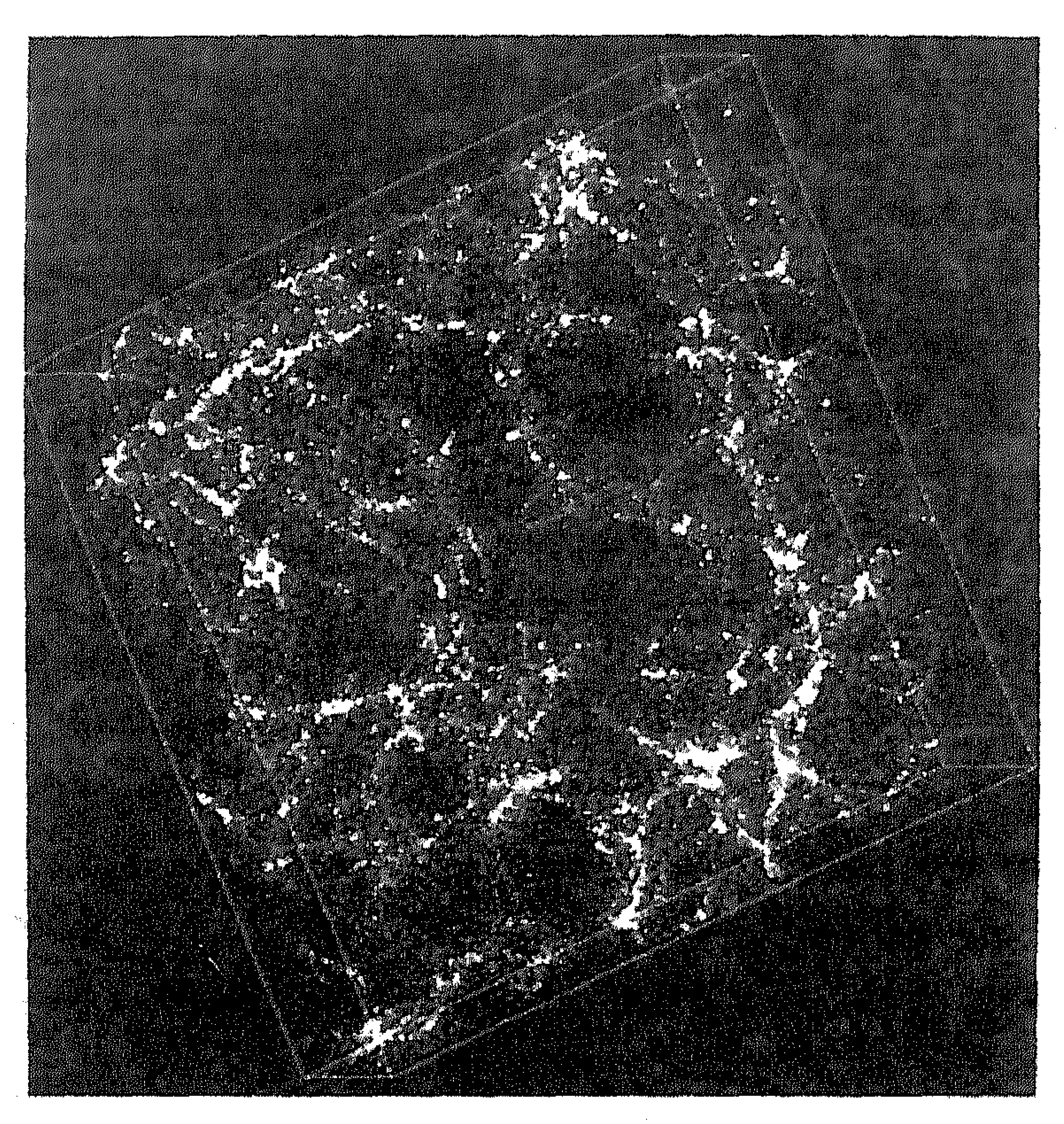
إن الكثير من الفلكيين اليوم مقتنعون بأن الهيكل الكونى على المدى الواسع يجد أصله فى التذبذبات التى حدثت بعد نشأته بفترة ضئيلة، أما ما يمكن للهيولية أن تلعبه، إذا كان لها وجود أصلا، فأمر غير مؤكد، ولكنه دورها محتمل بقدر كبير.

إن أول ملامح عدم التجانس فى نسيج الكون قد بدت فى أواخر السبعينات وبداية الثمانينات. إنه يحتوى على مناطق شاسعة خالية من أية أجرام. كما أن الحشود

الفائقة للمجرات (حشود من الحشود المجرية) ليست موزعة بانتظام. كان جيمس بيبل James Peebles فى شك من ذلك، وكان يعتقد أنه على المستوى الكبير جدا للكون سيكون توزيع المادة منتظما. وللتأكد من ذلك قام برسم مخطط تقريبى لمليون من المجرات، وكانت دهشته بالغة أن وجدها غير منتظمة التوزيع. فتوجد مناطق مكدسة منها مقابل مناطق خالية.



توزيع بيبل للمجرات ثنائي الأبعاد



تمثيل حاسوبي لتوزيع المجرات

ولكن هل هذه المشاهدات سارية بشكل مطرد؟ إن مخطط بيبل ثنائي الأبعاد، ربما كان لذلك تأثير على تصور نسيج الكون. إن المطلوب إذن هو مخطط ثلاثي الأبعاد، والحصول على مثل ذلك المخطط يمثل تحديا ليس بالهين. إن الانزياح الأحمر لكافة المجرات مطلوب، وقد رسم بيبل المخطط لمليون منها تقريبا فقط. ويستخلص الانزياح الأحمر من طيف المجرات، ويبين سرعة تباعدها عنا. في ذلك الوقت كان استخلاص الطيف لمجرة واحدة يستغرق عدة ساعات.

وقرر مارك ديفز Marc Davis وجون هتشرا John Huchra اللذان كانا وقتها في جامعة هارفارد أن يحاولا عمل ذلك. لم يكن بإمكانهما الحصول على مليون، أو حتى عدة مئات من الآلاف، من أطياف المجرات، ولكن يمكنهما الحصول على العدد الكافي

لعمل مخطط ثلاثي الأبعاد. قررا أن يبدآ بعدد ٢٤٠٠ طيف، وهو ما يستغرق فى تقديرهما عامين. وحين حصلا على ما يريدان قاما بعمل المخطط، ووجداه على نفس شاكلة السابق، فخططا لمد أفقه ليشمل المجرات المعتمة، ولكن ديفز وجد له عملا آخر، فكان على هتشرا أن يكمل المسيرة بمفرده.

فى ذلك الحين عادت مارجريت جيلر Margaret Geller من منحة دراسية فى إنجلترا، فضمها هتشرا لفريقه. كانت أول مشكلة عليهما مواجهتها هو مد نطاق البحث، ولما كان من المتعذر الحصول على كل المجرات الأكثر إعتاما عما حصل عليه سابقا، فقد قررا قصر البحث على منطقة معينة من الكون عبارة عن قوس دائري. وبعد الحصول على بيانات عن ثلاثة من هذه الأقواس، بدأت ملامح هيكل معين تتكشف. لقد ظهرت فقاعات كروية بعضها يصل قطره إلى ١٥٠ مليون سنة ضوئية، البعض منها ينتمى إلى الفضاءات التى رئيت سابقا، ولكنهما رأيا نمطا أكثر عمومية. لقد بدا الكون وكأنه مكون من حشود فائقة موزعة على سطح تلك الفقاعات الهائلة.

وفى عام ١٩٨٩ أعلن دافيد كو David Koo وريتشارد كورن Richard Korn من جامعة كاليفورنيا عن نتائج فحص أكثر عمقا مما وصل إليه هتشرا وجيلر، ولكن فى اتجاه مستقيم ضيق. لقد بينا أنهما عثرا على "حوائط مجرية"، حشود مكدسة من المجرات لدرجة أنها تشبه الحوائط بالمعنى الحرفي. وقد بينت عمليات مسح أخرى نفس الظاهرة، منها ما يشار إليه بعملية QDOT، وهى الأحرف الأولى من الجامعات المشتركة فى مشروع المسح (كوينز، دورهام، أوكسفورد وتورونتو). إن الاقتناع الشائع اليوم أن الكون مكون من حوائط تجعله أشبه بقرص العسل، فما الذى شكله على هذه الصورة؟ إن عددا من المحاكيات الحاسوبية قد حاكت ذلك بصورة جيدة. على أية حال فالعلماء فى كافة الأحوال مجبرون على الاعتراف بما يطلق عليه المادة المعتمة، وهى مادة ليس لنا أن نراها ولكن يعتقد بوجودها بسبب ما يشاهد من آثارها الجذبية. إن الجزء الأكبر من الكون يعتقد فى الواقع أنه مكون من المادة المعتمة.

وبصرف النظر عن وجود هذه المادة، فإن السؤال الجوهرى لا يزال قائما، وهو المتعلق بمنشأ عدم التجانس الطفيف الذى نتج عنه المجرات. المفروض أن يكون قد ظهر فى لحظات خلق الكون الأولى، والتى فيها كانت الظواهر الكمية هى السائدة. وطبقا للتصور السائد، فإن الكون عانى من اختلاجات طفيفة، وهو ما يعتبر نتيجة لعدم

اليقين الكمى الذى ينص على أن قيم كميات مثل الطاقة والزمن والموضع والسرعة لا يمكن تحديدها تحديدا قاطعا، ولذا فيمكنها أن تتذبذب تذبذبا طفيفا. إن تفاصيل هذه العملية لم تتضح بعد، بل إننا لا ندرى مدى صحتها. فهل كانت للهيولية دور فيها؟ لقد كان الكون فى حالة قريبة من الهيولية يوما ما، وحيث إن الوصف الوحيد المقبول وقتها كانت النظرية الكمية، فإنه من المعقول أن نفترض ذلك.

وإذا ما رجعنا القهقرى بدرجة أكبر تجاه لحظة نشأة الكون، فإننا نصل إلى منطقة تنهار فيها كافة القوانين الفيزيائية، لقد كان الكون خلالها هيوليا، وليس تحت أيدينا نظرية تصفه. وقد اقترح جون هويلر John Wheeler أن "زَبَدا كميا" يجوز أن يكون قد تكون، زبد من فضاء ولافضاء، منطقة مضطربة ممتلئة بثقوب ديدان من الزمكان. إنها مناطق ضئيلة مكدسة تنتهى عندها صلاحية النظرية النسبية العامة. لوصف ذلك نحتاج إلى علم كونيات كمي، وليس تحت أيدينا شيء من هذا القبيل بعد، ومن ثم فهو موضع آخر يمكن للهيولية أن تلعب دورا فيه.

الهيولية والنظرية الجامعة

تشدنا مسألة المفردة الأولية للكون إلى ما يسمى النظرية الجامعة، والتى يفترض فيها أن تشرح منشأ الكون وكل ما فيه من ظواهر. فالمفروض أن تضم النظرية النسبية العامة والنظرية الكمية، وتصف الجسيمات الأولية والقوى الأساسية للطبيعة (الجاذبية والكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة والقوة النووية القوية). الأكثر من ذلك أنه ينتظر منها أن تستخلص كافة القوانين وكافة الثوابت مثل سرعة الضوء وثابت بلانك.

لقد كانت صياغة مثل هذه النظرية هدفا للعديد من العلماء على مدى عقود من السنين. وهم يتقدمون لهذا الهدف اليوم على عدة جبهات. ومن النظريات الواعدة فى هذا الشأن نظرية تسمى "الأوتار الفائقة" supestrings، وهى تفترض وجود أوتار تصنع منها كافة الجسيمات الأولية، كما تشرح قوى الطبيعة بدلالتها، ولكن نجاحها إلى اليوم لا يزال محدودا.

إن نظرية عن علم الفلك الكمي، تعتبر لو نجحت خطوة هامة فى طريق النظرية الجامعة، قد صاغها جون هويلر من برنستون وبرايس دى ويت Bryce De Witt من جامعة تكساس. لقد علمنا أن معادلة شرودنجر بالنسبة لنظرية ميكانيكا الكم تعتبر معادلة مركزية. إنها تعطى التطور الزمنى للدالة الموجية التى تمثل النظام. وقد صاغ

هويلر ودى ويت معادلة تماثل معادلة شرودنجر، ولكنها تحتوى على بعض مظاهر النظرية النسبية العامة. وتسمى المعادلة الموجية فى هذه الحالة "الدالة الموجية للكون". من الوجهة النظرية لو أنك استطعت حل هذه النظرية فإنه يكون بإمكانك أن تحدد أى شيء تريد أن تعرفه عن الكون. يمكنك أن ترجع للماضى إلى لحظة نشأته، إلى المفردة، إلى ما بعد النقطة التى تنهار عندها نظرية النسبية.

على أنه هناك لسوء الحظ مصاعب مع الصورة الأساسية لمعادلة هيولر-دى ويت. فهى كمثل أية معادلة تفاضلية تحتاج لظروف أولية لحلها، ولكن هذه الظروف هى ما نبحث عنها. إننا نكون بذلك قد دخلنا فى حلقة مفرغة، يجب أن نكون عالمين بما نحتاج إلى معرفته.

لقد نشأنا على اعتياد بأن كل شيء قابل للتقدير، وأن العالم تحديدي. ولكن نظرية الهيولية قد بينت لنا أن هذا ليس صحيحا على الدوام. الكثير من الأشياء تتجاوز النمذجة الرياضية، ويعنى ذلك أن النظرية الجامعة قد لا يكون لها وجود، وقد تكون الهيولية هى ما يمنعنا من أن نعرف كل شيء.

(١) يعود الفضل في وضع نظرية الكم إلى ماكس بلانك في عام ١٩٠٠، ثم تطورت إلى ما يعرف باسم نظرية ميكانيكا الكم في العشرينات على يد نيلز بور وفرنر هايزنبرج (واضع مبدأ عدم اليقين) وإروين شرودنجر كما سيرد بعد قليل - المترجم

الفصل الخامس عشر

خـــاتمـــة

ننهى بذلك رحلتنا مع عالم الهيولية. لقد رأينا أن نظرية الهيولية تعتبر من أكثر تطورات العلم إثارة خلال الثلاثين عاما الأخيرة، تطور غير من نظرتنا للطبيعة كلية. فعلى مر التاريخ كان ينظر للكون على أنه تحديدي، فمع كم معقول من البيانات يمكن للمرء أن يتتبع تاريخ جسم على تاريخه كله، وهو ما يعنى أننا فى النهاية سوف نعلم كل شيء عن الكون من لحظة ميلاده إلى لحظة نهايته. ولكن هذا الأمل كان مبنيا على افتراض أن الظواهر الطبيعية خطية فى علاقاتها، توصف بمعادلات خطية متاحة الحل. على أنه بدأ يتكشف للعلماء أن هذا الافتراض عار من الصحة تماما، فأغلب ظواهر الطبيعة، إن لم تكن كلها، لاخطية العلاقات. ويترتب على اللاخطية الهيولية التى تعنى ضمنا استحالة التنبؤ. هذه الهيولية شيء مختلف تماما عن العشوائية، فلها هيكل منضبط يحكمها. إن المسارات الهيولية لا تضرب فى الفضاء على غير هدى، بل هى محدودة الحرية.

وكما رأينا فإن للهيولية تطبيقات هامة فى علم الفلك. فالفراغات داخل حزام الكويكبات يعتقد حاليا أنها نتاج هذه الحالة، ومدار قمر واحد على الأقل من أقمار كواكب المجموعة الشمسية، وكذلك مدارات بعض الكواكب ذاتها، هيولية. وفيما يتجاوز النظام الشمسى فقد أظهرت بعض النجوم المتغيرة سلوكا هيوليا، كما أن بعض نجوم مجرتنا ومجرات أخرى ذات مدارات هيولية. وأخيرا فقد رأينا أن الهيولية كامنة فى النظرية النسبية العامة، فى المدارات حول الثقوب السوداء، وفى علم الكونيات ودراسة منشأ الكون.

على أن ما فعلناه إلى الآن هو خدش على السطح، فتطبيق نظرية الهيولية على علم الفلك مجال مزدهر، وفى القريب العاجل سوف يقتحم آفاقا جديدة. من ذلك باطن الأرض، فنحن ما زلنا غير متأكدين تماما لما يجرى فيها، ولكن أثرا من ذلك نشاهده، وهو انعكاس محور المجال المغناطيسى لها على دورات مدتها من ١٠٠ إلى ١٥٠ ألف من الأعوام. إن هذا التغير يبدو عشوائيا، ولذا فليس من المستبعد أن يكون هيوليا.

كما أن للهيولية دور فى تفسير ما يجرى على سطح الأرض، والطقس على وجه الخصوص. كما أن للكواكب الأخرى طقسها، فالمريخ تكتسحه عواصف هوجاء، وتوجد شواهد على عواصف رعدية تحت سحب الزهرة والمشتري، قد تساعدنا الهيولية على تفسيرها.

كما قد يكون بإمكانها تفسير ما للشمس من أنشطة عنيفة غير متوقعة. بل إن أسطح كافة النجوم تبدو على هذه الشاكلة، فالنجوم النيوترونية تقذف بين الحين والآخر بدفقات عشوائية من أشعة إكس لا يعرف لها سببا.

ولقد تحدثنا عن المدارات الهيولية للنجوم والمجرات، ولكن قد يصدق القول على حشود المجرات والحشود الفائقة لها، فقد رأينا أن الهيكل العام للكون يمكن أن يكون ذا صبغة هيولية.

أخيرا، فإن لدينا نظرية الهيولية ذاتها؛ ما الذى ما يزال لديها؟ ما هى احتمالات تطورها فى السنوات القادمة؟ فرغم المجهوادت الهائلة التى بذلت، فالنظرية لا تخلو من مثالب، من أهمها أنها لا توصف بدقة الظروف المطلوبة لتتابع معين من الحوادث التى تؤدى للهيولية، بمعنى آخر فهى لا تقدم المتطلبات الأولية اللازمة للسلوك الهيولي. إن العلماء منكبون على دراسة هذه النقطة.

كذلك فقد يعن لنا أن نتساءل عما هو وراء الهيولية، فهناك اهتمام متزايد فيما يسمى "نقيض الهيولية" توضح على النحو التالي؛ إن الهيولية تعنى أن نظما غير منضبطة تنشأ من ظواهر بسيطة، ويقصد بنقيضها أن ظواهر معقدة قد تؤدى إلى نظم منضبطة.

من المجالات الأخرى التى يتزايد الاهتمام بها ما يتعلق بالمنطقة العازلة بين الهيولية واللاهيولية. إن صورا خلابة تشابه تلك التى أخذت من فئة ماندلبرو قد تم الحصول عليها، ولكن الأمر أكثر من صور خلابة. إن نتائج هامة فى هذا الموضوع قد تحققت بالفعل.

إن ظاهرة الهيولية معروفة منذ قرون، ولكن علم الهيولية ما زال فى مهده، فهو لم يدرس بجدية إلا خلال الثلاثين عاما الأخيرة.

إننا لسنا متأكدين مما يخبئه القدر، ولكن الآمال عريضة.

تعريف بالمؤلف

الدكتور باري باركر، حاصل على الدكتوراه من جامعة ولاية أوتاه Utah State University في علم الفيزياء، ويدرس بها علم الفلك وعلم الجسيمات ونظرية المجال، مشارك في الموسوعة البريطانية (فلك). له الكثير من المؤلفات التي حاز بسببها على العديد من الجوائز، من مؤلفاته:

Search for a Supertheory, The Vindication of the Big Bang, Einstein's Dream, The Concepts of the Cosmos, Invisible Matter and the Fate of the Universe, Colliding Galaxies.

تعريف بالمترجم

المهندس علي يوسف علي، حاصل على بكالوريوس الهندسة تخصص إلكترونيات عام ١٩٦٢ من جامعة الإسكندرية، وماجستير القانون عام ١٩٨١ من جامعة القاهرة، ودبلوم الترجمة عام ١٩٩٠ من جامعة الإسكندرية. عمل بمشروع السد العالي ثم بوزارة الكهرباء إلى أن طلب الإحالة للتقاعد عام ١٩٩٧ للتفرغ للترجمة. صدرت له عدة كتب منها : أسطورة اعادة ، تحليل وتصميم نظم المعلومات ، وتبسيط البرمجة ، وما وراء العلم ، والهيولية تصنع علماً جديداً .

محتويات الكتاب

المشروع القومى للترجمة

المشروع القومى للترجمة مشروع تنمية ثقافية بالدرجة الأولى ، ينطلق من الإيجابيات التى حققتها مشروعات الترجمة التى سبقته فى مصر والعالم العربى ويسعى إلى الإضافة بما يفتح الأفق على وعود المستقبل، معتمداً المبادئ التالية :

١- الخروج من أسر المركزية الأوروبية وهيمنة اللغتين الإنجليزية والفرنسية .

٢- التوازن بين المعارف الإنسانية فى المجالات العلمية والفنية والفكرية والإبداعية .

٣- الانحياز إلى كل ما يؤسس لأفكار التقدم وحضور العلم وإشاعة العقلانية والتشجيع على التجريب .

٤- ترجمة الأصول المعرفية التى أصبحت أقرب إلى الإطار المرجعى فى الثقافة الإنسانية المعاصرة، جنباً إلى جنب المنجزات الجديدة التى تضع القارئ فى القلب من حركة الإبداع والفكر العالميين .

٥- العمل على إعداد جيل جديد من المترجمين المتخصصين عن طريق ورش العمل بالتنسيق مع لجنة الترجمة بالمجلس الأعلى للثقافة .

٦- الاستعانة بكل الخبرات العربية وتنسيق الجهود مع المؤسسات المعنية بالترجمة .

المشروع القومى للترجمة

١ – اللغة العليا (طبعة ثانية)	جون كوين	ت : أحمد درويش
٢ – الوثنية والإسلام	ك. مادهو بانيكار	ت : أحمد فؤاد بلبع
٣ – التراث المسروق	جورج جيمس	ت : شوقى جلال
٤ – كيف تتم كتابة السيناريو	انجا كاريتنكوفا	ت : أحمد الحضرى
٥ – ثريا فى غيبوبة	إسماعيل فصيح	ت : محمد علاء الدين منصور
٦ – اتجاهات البحث اللسانى	ميلكا إفيتش	ت : سعد مصلوح / وفاء كامل فايد
٧ – العلوم الإنسانية والفلسفة	لوسيان غولدمان	ت : يوسف الأنطكى
٨ – مشعلو الحرائق	ماكس فريش	ت : مصطفى ماهر
٩ – التغيرات البيئية	أندرو س. جودى	ت : محمود محمد عاشور
١٠ – خطاب الحكاية	جيرار جينيت	ت : محمد معتصم وعبد الجليل الأزدى وعمر حلى
١١ – مختارات	فيسوافا شيمبوريسكا	ت : هناء عبد الفتاح
١٢ – طريق الحرير	ديفيد براونيستون وايرين فرانك	ت : أحمد محمود
١٣ – ديانة الساميين	روبرتسن سميث	ت : عبد الوهاب علوب
١٤ – التحليل النفسى والأدب	جان بيلمان نويل	ت : حسن المودن
١٥ – الحركات الفنية	إدوارد لويس سميث	ت : أشرف رفيق عفيفى
١٦ – أثينة السوداء	مارتن برنال	ت : بإشراف / أحمد عتمان
١٧ – مختارات	فيليب لاركين	ت : محمد مصطفى بدوى
١٨ – الشعر النسائى فى أمريكا اللاتينية	مختارات	ت : طلعت شاهين
١٩ – الأعمال الشعرية الكاملة	جورج سفيريس	ت : نعيم عطية
٢٠ – قصة العلم	ج. ج. كراوثر	ت: يمنى طريف الخولى / بدوى عبد الفتاح
٢١ – خوخة وألف خوخة	صمد بهرنجى	ت : ماجدة العنانى
٢٢ – مذكرات رحالة عن المصريين	جون أنتيس	ت : سيد أحمد على الناصرى
٢٣ – تجلى الجميل	هانز جيورج جادامر	ت : سعيد توفيق
٢٤ – ظلال المستقبل	باتريك بارندر	ت : بكر عباس
٢٥ – مثنوى	مولانا جلال الدين الرومى	ت : إبراهيم الدسوقى شتا
٢٦ – دين مصر العام	محمد حسين هيكل	ت : أحمد محمد حسين هيكل
٢٧ – التنوع البشرى الخلاق	مقالات	ت : نخبة
٢٨ – رسالة فى التسامح	جون لوك	ت : منى أبو سنه
٢٩ – الموت والوجود	جيمس ب. كارس	ت : بدر الديب
٣٠ – الوثنية والإسلام (ط٢)	ك. مادهو بانيكار	ت : أحمد فؤاد بلبع
٣١ – مصادر دراسة التاريخ الإسلامى	جان سوفاجيه – كلود كاين	ت : عبد الستار الحلوجى / عبد الوهاب علوب
٣٢ – الانقراض	ديفيد روس	ت : مصطفى إبراهيم فهمى
٣٣ – التاريخ الاقتصادى لإفريقيا الغربية	أ. ج. هوبكنز	ت : أحمد فؤاد بلبع
٣٤ – الرواية العربية	روجر آلن	ت : حصة إبراهيم المنيف
٣٥ – الأسطورة والحداثة	پول . ب . ديكسون	ت : خليل كلفت

٣٦ - نظريات السرد الحديثة	والاس مارتن	ت : حياة جاسم محمد
٣٧ - واحة سيوة وموسيقاها	بريجيت شيفر	ت : جمال عبد الرحيم
٣٨ - نقد الحداثة	آلن تورين	ت : أنور مغيث
٣٩ - الإغريق والحسد	بيتر والكوت	ت : منيرة كروان
٤٠ - قصائد حب	آن سكستون	ت : محمد عيد إبراهيم
٤١ - ما بعد المركزية الأوربية	بيتر جران	ت : عاطف أحمد / إبراهيم فتحى / محمود ماجد
٤٢ - عالم ماك	بنجامين باربر	ت : أحمد محمود
٤٣ - اللهب المزدوج	أوكتافيو باث	ت : المهدى أخريف
٤٤ - بعد عدة أصياف	ألدوس هكسلى	ت : مارلين تادرس
٤٥ - التراث المغدور	روبرت ج دنيا - جون ف أ فاين	ت : أحمد محمود
٤٦ - عشرون قصيدة حب	بابلو نيرودا	ت : محمود السيد على
٤٧ - تاريخ النقد الأدبى الحديث (١)	رينيه ويليك	ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
٤٨ - حضارة مصر الفرعونية	فرانسوا دوما	ت : ماهر جويجاتى
٤٩ - الإسلام فى البلقان	هـ . ت . نوريس	ت : عبد الوهاب علوب
٥٠ - ألف ليلة وليلة أو القول الأسير	جمال الدين بن الشيخ	ت : محمد برادة وعثمانى الميلود ويوسف الأنطكى
٥١ - مسار الرواية الإسبانو أمريكية	داريو بيانوبيا وخ. م بينياليستى	ت : محمد أبو العطا
٥٢ - العلاج النفسى التدعيمى	بيتر . ن . نوفاليس وستيفن . ج . روجسيفيتز وروجر بيل	ت : لطفى فطيم وعادل دمرداش
٥٣ - الدراما والتعليم	أ . ف . ألنجتون	ت : مرسى سعد الدين
٥٤ - المفهوم الإغريقى للمسرح	ج . مايكل والتون	ت : محسن مصيلحى
٥٥ - ما وراء العلم	چون بولكنجهوم	ت : على يوسف على
٥٦ - الأعمال الشعرية الكاملة (١)	فديريكو غرسية لوركا	ت : محمود على مكى
٥٧ - الأعمال الشعرية الكاملة (٢)	فديريكو غرسية لوركا	ت : محمود السيد ، ماهر البطوطى
٥٨ - مسرحيتان	فديريكو غرسية لوركا	ت : محمد أبو العطا
٥٩ - المحبرة	كارلوس مونييث	ت : السيد السيد سهيم
٦٠ - التصميم والشكل	جوهانز ايتين	ت : صبرى محمد عبد الغنى
٦١ - موسوعة علم الإنسان	شارلوت سيمور - سميث	مراجعة وإشراف : محمد الجوهرى
٦٢ - لذّة النّص	رولان بارت	ت : محمد خير البقاعى .
٦٣ - تاريخ النقد الأدبى الحديث (٢)	رينيه ويليك	ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
٦٤ - برتراند راسل (سيرة حياة)	آلان وود	ت : رمسيس عوض .
٦٥ - فى مدح الكسل ومقالات أخرى	برتراند راسل	ت : رمسيس عوض .
٦٦ - خمس مسرحيات أندلسية	أنطونيو جالا	ت : عبد اللطيف عبد الحليم
٦٧ - مختارات	فرناندو بيسوا	ت : المهدى أخريف
٦٨ - نتاشا العجوز وقصص أخرى	فالنتين راسبوتين	ت : أشرف الصباغ
٦٩ - العالم الإسلامى فى أوائل القرن العشرين	عبد الرشيد إبراهيم	ت : أحمد فؤاد متولى وهويدا محمد فهمى
٧٠ - ثقافة وحضارة أمريكا اللاتينية	أوخينيو تشانج رودريجت	ت : عبد الحميد غلاب وأحمد حشاد
٧١ - السيدة لا تصلح إلا للرمى	داريو فو	ت : حسين محمود

٧٢ – السياسى العجوز	ت . س . إليوت	ت فؤاد مجلى
٧٣ – نقد استجابة القارئ	چين . ب . توميكنز	ت حسن ناظم وعلى حاكم
٧٤ – صلاح الدين والمماليك فى مصر	ل . ا . سيمينوڤا	ت · حسن بيومى
٧٥ – فن التراجم والسير الذاتية	أندريه موروا	ت · أحمد درويش
٧٦ – چاك لاكان وإغواء التحليل النفسى	مجموعة من الكتاب	ت عبد المقصود عبد الكريم
٧٧ – تاريخ النقد الأدبى الحديث ج ٣	رينيه ويليك	ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
٧٨ – العولمة : النظرية الاجتماعية والثقافة الكونية	رونالد روبرتسون	ت : أحمد محمود ونورا أمين
٧٩ – شعرية التأليف	بوريس أوسبنسكى	ت : سعيد الغانمى وناصر حلاوى
٨٠ – بوشكين عند «نافورة الدموع»	ألكسندر بوشكين	ت : مكارم الغمرى
٨١ – الجماعات المتخيلة	بندكت أندرسن	ت : محمد طارق الشرقاوى
٨٢ – مسرح ميجيل	ميجيل دى أونامونو	ت : محمود السيد على
٨٣ – مختارات	غوتفريد بن	ت : خالد المعالى
٨٤ – موسوعة الأدب والنقد	مجموعة من الكتاب	ت · عبد الحميد شيحة
٨٥ – منصور الحلاج (مسرحية)	صلاح زكى أقطاى	ت : عبد الرازق بركات
٨٦ – طول الليل	جمال مير صادقى	ت : أحمد فتحى يوسف شتا
٨٧ – نون والقلم	جلال آل أحمد	ت : ماجدة العنانى
٨٨ – الابتلاء بالتغرب	جلال آل أحمد	ت : إبراهيم الدسوقى شتا
٨٩ – الطريق الثالث	أنتونى جيدنز	ت : أحمد زايد ومحمد محيى الدين
٩٠ – وسم السيف (قصص)	نخبة من كُتاب أمريكا اللاتينية	ت : محمد إبراهيم مبروك
٩١ – المسرح والتجريب بين النظرية والتطبيق	باربر الاسوستكا	ت : محمد هناء عبد الفتاح
٩٢ – أساليب ومضامين المسرح الإسبانوأمريكى المعاصر	كارلوس ميجل	ت : نادية جمال الدين
٩٣ – محدثات العولمة	مايك فيذرستون وسكوت لاش	ت : عبد الوهاب علوب
٩٤ – الحب الأول والصحبة	صمويل بيكيت	ت : فوزية العشماوى
٩٥ – مختارات من المسرح الإسبانى	أنطونيو بويرو باييخو	ت : سرى محمد محمد عبد اللطيف
٩٦ – ثلاث زنبقات ووردة	قصص مختارة	ت : إدوار الخراط
٩٧ – هوية فرنسا (مج ١)	فرنان برودل	ت : بشير السباعى
٩٨ – الهم الإنسانى والابتزاز الصهيونى	نماذج ومقالات	ت : أشرف الصباغ
٩٩ – تاريخ السينما العالمية	ديڤيد روبنسون	ت : إبراهيم قنديل
١٠٠ – مساءلة العولمة	بول هيرست وجراهام تومبسون	ت : إبراهيم فتحى
١٠١ – النص الروائى (تقنيات ومناهج)	بيرنار فاليط	ت : رشيد بنحدو
١٠٢ – السياسة والتسامح	عبد الكريم الخطيبى	ت : عز الدين الكتانى الإدريسى
١٠٣ – قبر ابن عربى يليه آياء	عبد الوهاب المؤدب	ت : محمد بنيس
١٠٤ – أوبرا ماهوجنى	برتولت بريشت	ت . عبد الغفار مكاوى
١٠٥ – مدخل إلى النص الجامع	چيرارچينيت	ت : عبد العزيز شبيل
١٠٦ – الأدب الأندلسى	د. ماريا خيسوس روبييرامتى	ت : أشرف على دعدور
١٠٧ – صورة الفدائى فى الشعر الأمريكى المعاصر	نخبـة	ت : محمد عبد الله الجعيدى

١٠٨ – ثلاث دراسات عن الشعر الأندلسى	مجموعة من النقاد	ت : محمود على مكى
١٠٩ – حروب المياه	چون بولوك وعادل درويش	ت : هاشم أحمد محمد
١١٠ – النساء فى العالم النامى	حسنة بيجوم	ت : منى قطان
١١١ – المرأة والجريمة	فرانسيس هيندسون	ت : ريهام حسين إبراهيم
١١٢ – الاحتجاج الهادئ	أرلين علوى ماكليود	ت : إكرام يوسف
١١٣ – راية التمرد	سادى پلانت	ت : أحمد حسان
١١٤ – مسرحيتا حصاد كونجى وسكان المستنقع	وول شوينكا	ت : نسيم مجلى
١١٥ – غرفة تخص المرء وحده	فرچينيا وولف	ت : سمية رمضان
١١٦ – امرأة مختلفة (درية شفيق)	سينثيا نلسون	ت : نهاد أحمد سالم
١١٧ – المرأة والجنوسة فى الإسلام	ليلى أحمد	ت : منى إبراهيم ، وهالة كمال
١١٨ – النهضة النسائية فى مصر	بث بارون	ت : لميس النقاش
١١٩ – النساء والأسرة وقوانين الطلاق	أميرة الأزهرى سنبل	ت : بإشراف/ رؤوف عباس
١٢٠ – الحركة النسائية والتطور فى الشرق الأوسط	ليلى أبو لغد	ت : نخبة من المترجمين
١٢١ – الدليل الصغير فى كتابة المرأة العربية	فاطمة موسى	ت : محمد الجندى ، وإيزابيل كمال
١٢٢ –نظام العبودية القديم ونموذج الإنسان	جوزيف فوجت	ت : منيرة كروان
١٢٣–الإمبراطورية العثمانية وعلاقاتها الدولية	نيئل الكسندر وفنادولينا	ت: أنور محمد إبراهيم
١٢٤ – الفجر الكاذب	چون جراى	ت : أحمد فؤاد بلبع
١٢٥ – التحليل الموسيقى	سيدريك ثورپ ديڤى	ت : سمحه الخولى
١٢٦ – فعل القراءة	ڤولڤانج إيسر	ت : عبد الوهاب علوب
١٢٧ – إرهاب	صفاء فتحى	ت : بشير السباعى
١٢٨ – الأدب المقارن	سوزان باسنيت	ت : أميرة حسن نويرة
١٢٩ – الرواية الاسبانية المعاصرة	ماريا دولورس أسيس جاروته	ت : محمد أبو العطا وآخرون
١٣٠ – الشرق يصعد ثانية	أندريه جوندر فرانك	ت : شوقى جلال
١٣١ – مصر القديمة (التاريخ الاجتماعى)	مجموعة من المؤلفين	ت : لويس بقطر
١٣٢ – ثقافة العولمة	مايك فيذرستون	ت : عبد الوهاب علوب
١٣٣ – الخوف من المرايا	طارق على	ت : طلعت الشايب
١٣٤ – تشريح حضارة	بارى ج. كيمب	ت : أحمد محمود
١٣٥ – المختار من نقد ت. س. إليوت (ثلاثة أجزاء)	ت. س. إليوت	ت : ماهر شفيق فريد
١٣٦ – فلاحو الباشا	كينيث كونو	ت : سحر توفيق
١٣٧ – مذكرات ضابط فى الحملة الفرنسية	جوزيف مارى مواريه	ت : كاميليا صبحى
١٣٨ – عالم التليفزيون بين الجمال والعنف	إيڤلينا تارونى	ت : وجيه سمعان عبد المسيح
١٣٩ – پارسيڤال	ريشارد ڤاچنر	ت : مصطفى ماهر
١٤٠ – حيث تلتقى الأنهار	هربرت ميسن	ت : أمل الجبورى
١٤١ – اثنتا عشرة مسرحية يونانية	مجموعة من المؤلفين	ت : نعيم عطية
١٤٢ – الإسكندرية : تاريخ ودليل	أ. م. فورستر	ت : حسن بيومى
١٤٣ – قضايا التنظير فى البحث الاجتماعى	ديريك لايدار	ت : عدلى السمرى
١٤٤ – صاحبة اللوكاندة	كارلو جولدونى	ت : سلامة محمد سليمان

١٤٥ - موت أرتيميو كروث	كارلوس فوينتس	ت . أحمد حسان
١٤٦ - الورقة الحمراء	ميجيل دى ليبس	ت علی عبد الرؤوف البمبی
١٤٧ - خطبة الإدانة الطويلة	تانكريد دورست	ت : عبد الغفار مكاوى
١٤٨ - القصة القصيرة (النظرية والتقنية)	إنريكى أندرسون إمبرت	ت علی إبراهيم علی منوفی
١٤٩ - النظرية الشعرية عند إليوت وأدونيس	عاطف فضول	ت : أسامة إسبر
١٥٠ - التجربة الإغريقية	روبرت ج. ليتمان	ت منيرة كروان
١٥١ - هوية فرنسا (مج ٢ ، ج ١)	فرنان برودل	ت : بشير السباعى
١٥٢ - عدالة الهنود وقصص أخرى	نخبة من الكُتاب	ت : محمد محمد الخطابى
١٥٣ - غرام الفراعنة	فيولين فانويك	ت : فاطمة عبد الله محمود
١٥٤ - مدرسة فرانكفورت	فيل سليتر	ت : خليل كلفت
١٥٥ - الشعر الأمريكى المعاصر	نخبة من الشعراء	ت : أحمد مرسى
١٥٦ - المدارس الجمالية الكبرى	جى أنبال وآلان وأوديت فيرمو	ت : مى التلمسانى
١٥٧ - خسرو وشيرين	النظامى الكنوجى	ت : عبد العزيز بقوش
١٥٨ - هوية فرنسا (مج ٢ ، ج٢)	فرنان برودل	ت : بشير السباعى
١٥٩ - الإيديولوجية	ديڤيد هوكس	ت : إبراهيم فتحى
١٦٠ - آلة الطبيعة	بول إيرليش	ت : حسين بيومى
١٦١ - من المسرح الإسبانى	اليخاندرو كاسونا وأنطونيو جالا	ت : زيدان عبد الحليم زيدان
١٦٢ - تاريخ الكنيسة	يوحنا الآسيوى	ت : صلاح عبد العزيز محجوب
١٦٣ - موسوعة علم الاجتماع ج ١	جوردون مارشال	ت بإشراف : محمد الجوهرى
١٦٤ - شامبوليون (حياة من نور)	چان لاكوتير	ت : نبيل سعد
١٦٥ - حكايات الثعلب	أ . ن أفانا سيفا	ت : سهير المصادفة
١٦٦ - العلاقات بين المتدينين والعلمانيين فى إسرائيل	يشعياهو ليڤمان	ت : محمد محمود أبو غدير
١٦٧ - فى عالم طاغور	رابندرانات طاغور	ت : شكرى محمد عياد
١٦٨ - دراسات فى الأدب والثقافة	مجموعة من المؤلفين	ت : شكرى محمد عياد
١٦٩ - إبداعات أدبية	مجموعة من المبدعين	ت : شكرى محمد عياد
١٧٠ - الطريق	ميغيل دليبيس	ت : بسام ياسين رشيد
١٧١ - وضع حد	فرانك بيجو	ت : هدى حسين
١٧٢ - حجر الشمس	مختارات	ت : محمد محمد الخطابى
١٧٣ - معنى الجمال	ولتر ت . ستيس	ت : إمام عبد الفتاح إمام
١٧٤ - صناعة الثقافة السوداء	ايليس كاشمور	ت : أحمد محمود
١٧٥ - التليفزيون فى الحياة اليومية	لورينزو فيلشس	ت : وجيه سمعان عبد المسيح
١٧٦ - نحو مفهوم للاقتصاديات البيئية	توم تيتنبرج	ت : جلال البنا
١٧٧ - أنطون تشيخوف	هنرى ترويا	ت : حصة إبراهيم منيف
١٧٨ - مختارات من الشعر اليونانى الحديث	نخبة من الشعراء	ت : محمد حمدى إبراهيم
١٧٩ - حكايات أيسوب	أيسوب	ت : إمام عبد الفتاح إمام
١٨٠ - قصة جاويد	إسماعيل فصيح	ت : سليم عبدالأمير حمدان
١٨١ - النقد الأدبى الأمريكى	فنسنت . ب . ليتش	ت : محمد يحيى

١٨٢ – العنف والنبوءة	و . ب . ييتس	ت : ياسين طه حافظ
١٨٣ – چان كوكتو على شاشة السينما	رينيه چيلسون	ت : فتحى العشرى
١٨٤ – القاهرة .. حالمة لا تنام	هانز إيندورفر	ت : دسوقى سعيد
١٨٥ – أسفار العهد القديم	توماس تومسن	ت : عبد الوهاب علوب
١٨٦ – معجم مصطلحات هيجل	ميخائيل أنوود	ت : إمام عبد الفتاح إمام
١٨٧ – الأرضة	بُزُرْج علَوى	ت : علاء منصور
١٨٨ – موت الأدب	ألڤين كرنان	ت : بدر الديب
١٨٩ – العمى والبصيرة	پول دى مان	ت : سعيد الغانمى
١٩٠ – محاورات كونفوشيوس	كونفوشيوس	ت : محسن سيد فرجانى
١٩١ – الكلام رأسمال	الحاج أبو بكر إمام	ت : مصطفى حجازى السيد
١٩٢ – سياحتنامه إبراهيم بيك	زين العابدين المراغى	ت : محمود سلامة علاوى
١٩٣ – عامل المنجم	بيتر أبراهامز	ت : محمد عبد الواحد محمد
١٩٤ – مختارات من النقد الأنجلو – أمريكى	مجموعة من النقاد	ت : ماهر شفيق فريد
١٩٥ – شتاء ٨٤	إسماعيل فصيح	ت : محمد علاء الدين منصور
١٩٦ – المهلة الأخيرة	فالنتين راسبوتين	ت : أشرف الصباغ
١٩٧ – الفاروق	شمس العلماء شبلى النعمانى	ت : جلال السعيد الحفناوى
١٩٨ – الاتصال الجماهيرى	إدوين إمرى وآخرون	ت : إبراهيم سلامة إبراهيم
١٩٩ – تاريخ يهود مصر فى الفترة العثمانية	يعقوب لانداوى	ت : جمال أحمد الرفاعى وأحمد عبد اللطيف حماد
٢٠٠ – ضحايا التنمية	جيرمى سيبروك	ت : فخرى لبيب
٢٠١ – الجانب الدينى للفلسفة	جوزايا رويس	ت : أحمد الأنصارى
٢٠٢ – تاريخ النقد الأدبى الحديث جـ٤	رينيه ويليك	ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
٢٠٣ – الشعر والشاعرية	ألطاف حسين حالى	ت : جلال السعيد الحفناوى
٢٠٤ – تاريخ نقد العهد القديم	زالمان شازار	ت : أحمد محمود هويدى
٢٠٥ – الجينات والشعوب واللغات	لويجى لوقا كافاللى – سفورزا	ت : أحمد مستجير
٢٠٦ – الهيولية تصنع علمًا جديدًا	جيمس جلايك	ت : على يوسف على
٢٠٧ – ليل إفريقى	رامون خوتاسنديز	ت : محمد أبو العطا عبد الرؤوف
٢٠٨ – شخصية العربى فى المسرح الإسرائيلى	دان أوريان	ت : محمد أحمد صالح
٢٠٩ – السرد والمسرح	مجموعة من المؤلفين	ت : أشرف الصباغ
٢١٠ – مثنويات حكيم سنائى	سنائى الغزنوى	ت : يوسف عبد الفتاح فرج
٢١١ – فردينان دوسوسير	جوناثان كلر	ت : محمود حمدى عبد الغنى
٢١٢ – قصص الأمير مرزبان	مرزبان بن رستم بن شروين	ت : يوسف عبد الفتاح فرج
٢١٣ – مصر منذ قدوم نابليون حتى رحيل عبد الناصر	ريمون فلاور	ت : سيد أحمد على الناصرى
٢١٤ – قواعد جديدة للمنهج فى علم الاجتماع	أنتونى جيدنز	ت : محمد محمود محى الدين
٢١٥ – سياحت نامه إبراهيم بيك جـ٢	زين العابدين المراغى	ت : محمود سلامة علاوى
٢١٦ – جوانب أخرى من حياتهم	مجموعة من المؤلفين	ت : أشرف الصباغ
٢١٧ – مسرحيتان طليعيتان	صمويل بيكيت	ت : نادية البنهاوى
٢١٨ – رايولا	خوليو كورتازان	ت : على إبراهيم على منوفى

طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

رقم الإيداع ٧٠٧٤ / ٢٠٠٢





ظهرت نظرية الهيولية choos Theor لتقدم للفكر الإنسانى رسالة مهمة ، مضمونها أن ما يظن من ظواهر الطبيعة من فوضى أو عشوائية هى أبعد ما تكون عن هذا التصور ؛ فظواهر الطبيعة مبنية على قوانين حاكمة ، ولكنها قد تخرج عن حالة النظام إلى اللانظام لأسباب تتناولها النظرية بالتحليل . إن رسالة هذه النظرية يمكن بلورتها فى العبارة التالية «إن كل فوضى هى لانظام ، ولكن ليس كل لا نظام فوضى» .

ولم تترك النظرية مجالاً علمياً إلا وعالجت ظواهره بأساليبها التحليلية، ويتناول كتابنا هذا الظواهر الكونية من منظور هذه النظرية، بعد تقديم شرحٍ وافٍ ومبسطٍ لها ، وتعريف بأهم روادها ؛ فيقدم لنا تفسير حلقات زحل ، وتصرفات حزام الكويكبات ، وبقعة المشترى الحمراء ، وغير ذلك من ظواهر حيرت ألباب العلماء قروناً طويلة .

الغلاف : سعيد المسيرى